



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
EN ENERGÍA - PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

SISTEMA DESHIDRATADOR GEOTÉRMICO DE ALIMENTOS (DGA 200)  
FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS SENSORIAL Y MICROBIOLÓGICO.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
EDUARDO PÉREZ GONZÁLEZ

TUTOR PRINCIPAL  
Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez, Instituto de Ingeniería  
COMITÉ TUTOR  
Dra. Patricia Severiano Pérez, Facultad de Química  
Dr. Martín Salinas Vázquez, Instituto de Ingeniería  
Dr. Agustín Valera Medina, Universidad de Cardiff  
Dr. Daniel Saucedo Carvajal, CICESE

Cd. Mx. Marzo, 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Martín Salinas Vázquez

Secretario: Dra. Patricia Severiano Pérez

1 er. Vocal: Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez

2 do. Vocal: Dr. Agustín Valera Medina

3 er. Vocal: Dr. Daniel Saucedo Carvajal

Ciudad Universitaria Posgrado de Ingeniería UNAM

Ciudad de México, febrero de 2023

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez



-----  
**FIRMA**



## DEDICATORIAS

A Dios por todas las personas y oportunidades que se han puesto en mi camino para que este trabajo tuviera éxito.

A toda mi familia:

- Mi esposa Mayra, por su apoyo incondicional durante este viaje con momentos gratos y otros más gratos, pues sin importar el tamaño de las adversidades, todos mis recuerdos a su lado tienen risas, carcajadas, comilonas, desveladas y más, todo siempre sazonado con amor.
- Mi mamá Patricia y mi papá Mario, quienes siempre han estado ahí incondicionalmente y me han enseñado que el trabajo y la diversión no están peleadas, porque hoy disfruto lo que hago.
- A mi hermano, Fernando, de quien admiro mucho su nobleza y conocimientos sobre muchos temas que ignoro. Gracias por disipar mi ignorancia.
- A mis suegros, Fili y Manuel, quienes me han recibido en su casa como un hijo más, me siento muy afortunado de ahora ser parte de su familia.
- A Miriam, Daniel, Sofía, Noe, Emy y Mateo porque hemos pasado momentos geniales y que gracias a ellos mis recuerdos están llenos de risas, dicha y gozo, agradezco al universo sean mi familia también.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco el apoyo que brindo la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado al proyecto P11 Desarrollo Tecnológico para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica de Baja Entalpía, a través del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo).

Agradezco, también, el apoyo incondicional del Departamento de Alimentos y Biotecnología de la Facultad de Química UNAM, el cual dirige la Dra. Patricia Severiano Pérez en la parte sensorial y la Mtra Olga del Carmen Velázquez Madrazo en la parte microbiológica.

Agradezco al grupo iiDEA, su apoyo, oportunidades y confianza que me han brindado, donde me he formado profesionalmente y con quien espero poder seguir colaborando muchos años más.

Agradezco también, a los integrantes del jurado por compartir sus conocimientos a través de sus observaciones y correcciones durante el desarrollo de este trabajo.





# CONTENIDO

<b>1 EL PAPEL DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA.....</b>	<b>1</b>
1.1 DEFINICIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA .....	1
1.2 USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA .....	2
1.3 USOS INDUSTRIALES .....	4
1.4 SUMINISTRO DE ALIMENTOS .....	8
<b>2 DESHIDRATADOR GEOTÉRMICO DE ALIMENTOS, DGA 200 .....</b>	<b>13</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	13
2.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	14
2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	14
2.3.1 <i>Obra de toma</i> .....	15
2.3.2 <i>Sistema de intercambio de calor</i> .....	17
2.3.3 <i>Descripción del sistema deshidratador</i> .....	20
2.3.4 <i>Sistema de transporte del fluido geotérmico</i> .....	22
2.4 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EQUIPOS Y TUBERÍAS .....	23
2.4.1 <i>Método de selección de materiales</i> .....	23
2.4.2 <i>Selección de materiales para intercambiadores de calor</i> .....	27
2.5 MEMORIA DE CÁLCULO TÉRMICO DE EQUIPOS PRINCIPALES .....	33
2.5.1 <i>Metodología general</i> .....	33
2.5.2 <i>Cambiador de calor</i> .....	34
2.5.3 <i>Intercambiador de calor de placas tipo chevron</i> .....	37
2.5.4 <i>Sistema de bombeo</i> .....	41
<b>3 METODOLOGÍA, EVALUACIÓN DE LA PIÑA DESHIDRATADA .....</b>	<b>45</b>
3.1 MUESTRAS .....	45
3.2 DESHIDRATACIÓN DE PIÑA .....	45
3.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO .....	46
3.4 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS .....	47
3.5 EVALUACIÓN SENSORIAL, PERFIL FLASH (PF) MODIFICADO .....	47
3.6 ANÁLISIS INSTRUMENTAL: COLOR Y TEXTURA.....	48

3.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>51</b>
4.1	DESHIDRATACIÓN DE PIÑA.....	51
4.2	MICROBIOLÓGICO.....	51
4.3	FISICOQUÍMICO.....	53
4.4	ANÁLISIS SENSORIAL, PF MODIFICADO.....	55
4.5	ANÁLISIS FACTORIAL MÚLTIPLE, CORRELACIÓN ENTRE CARACTERÍSTICAS SENSORIALES Y COLOR Y TEXTURA INSTRUMENTAL.....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>APÉNDICE.....</b>	<b>67</b>
6.1	DISEÑO DE LA CÁMARA DE DESHIDRATACIÓN.....	74
6.1.1	<i>Resultados de la simulación.....</i>	<i>75</i>
6.1.2	<i>Validación de la simulación.....</i>	<i>76</i>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Capacidad Instalada en TJ/año por aplicación desarrolladas en el mundo.....	4
Tabla 2 Energía ahorrada para cada proceso industrial en función del rango de temperaturas al que se pueda acceder .....	5
Tabla 3 Ejemplos de desarrollos industriales más representativos con energía geotérmica en el mundo .....	6
Tabla 4 Anomalías geotérmicas ubicadas por estado y el potencial de desarrollo; Tabla elaborada con los datos reportados por Iglesias et al. (2015).....	12
Tabla 5 Resumen de la deshidratación con energía geotérmica en el mundo 2019 ...	14
Tabla 6 Condiciones de operación de los quipos .....	25
Tabla 7 Lista de materiales que no se deben usar en contacto con los alimentos (primeras dos columnas de la izquierda) y los que más se usan (columna de la derecha) .....	28
Tabla 8 Características de los Aceros Inoxidables según su tipo.....	29
Tabla 9 Composición química y propiedades de los aceros 304 y 304L .....	30
Tabla 10 Composición química y propiedades de los aceros 316 y 316L .....	31
Tabla 11 Tabla comparativa de los aceros 304, 304L, 316 y 316L .....	31
Tabla 12 Materiales seleccionados para los intercambiadores de calor .....	32
Tabla 13 Materiales de tuberías según el servicio .....	33
Tabla 14 Parámetros térmicos de operación del EA-02 .....	38
Tabla 15 Parámetros térmicos de operación de EA-01 .....	40
Tabla 16 Parámetros de operación de la bomba de agua de recirculación.....	42
Tabla 17 Información de los siete lotes procesados en el DGA 200 .....	46
Tabla 18 Evaluación microbiológica .....	52
Tabla 19 Determinación de humedad (%) en los lotes de piña deshidratada .....	53
Tabla 20 Resultados fisicoquímicos de las tres muestras de piña seleccionados.....	54
Tabla 21 Atributos definidos para evaluación de Perfil Flash .....	55
Tabla 22 Tabla descriptiva del nivel de maduración de la piña con base en su coloración externa .....	72
Tabla 23 Tabla descriptiva de las etapas del proceso de deshidratación de piña .....	73
Tabla 24 Propiedades del modelo 3D y configuraciones de las simulaciones .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 1 Diagrama de Venn del desarrollo sostenible en la confluencia de los tres pilares que lo caracterizan .....	xv
Fig. 2 Consumo Energético en México por sector, correspondiente al año 2018 en PJ .....	xvi
Fig. 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible con los que cumple el proyecto de deshidratación geotérmica de alimentos .....	xvii
Fig. 4 Concepto de uso en cascada (elaboración propia) .....	3
Fig. 5 Distribución de los UD en todo el mundo (capacidad en 2020). En total son 279 casos registrados .....	4
Fig. 6 Adaptación del diagrama de Lindal .....	7
Fig. 7 Potencial de participación de la energía geotérmica por sector comercial en México .....	9
Fig. 8 Factor de Planta de las renovables en México; 1) Biomasa (turbina lecho fluidizado circulante y turbina de vapor), 2) Eólico en costa, 3) Eólico en tierra, 4) Solar concentración termoeléctrica.....	10
Fig. 9 Punto de interconexión de recurso geotérmico hacia DGA 200 .....	15
Fig. 10 <b>Izquierda.</b> - Línea de toma desde la PS02; línea hacia proceso (flechas rojas), y retorno del fluido geotérmico (flechas verdes). El sistema cuenta con un juego de diferentes válvulas que facilitan la regulación de los niveles del agua en la plataforma; <b>Derecha.</b> - Instalación real en sitio.....	16
Fig. 11 A partir de una línea ya existente de vapor, se hizo una pequeña toma para alimentar al DGA 200 .....	16
Fig. 12 Diagrama de flujo de proceso de módulo DGA 200 .....	17
Fig. 13 Diagrama de Mollier; El área sombreada representa la zona libre de incrustaciones; Están representados los estados termodinámicos del fluido geotérmico (Fig. 14).....	18
Fig. 14 Diagrama de Flujo de Proceso del Sistema Deshidratador Geotérmico de Alimentos DGA 200.....	19
Fig. 15 Termografía del HPE y placa tipo chevron después de entrar en contacto con el agua geotérmica y después de un proceso de limpieza.....	20
Fig. 16 Isométrico de conexión, HPE (EA-01A, EA-01B y EA-01C) y EA-02 .....	21
Fig. 17 Diseño diagonal del distribuidor de aire.....	22

Fig. 18 Esquema del intercambiador de calor de placas .....	34
Fig. 19 Esquema del cambiador de calor de tubos aletados (EA-02), tipo radiador....	36
Fig. 20 Diagrama TQ del EA-02. En rojo la corriente de aire; en azul la corriente de agua de circulación .....	38
Fig. 21 Diagrama y datos de iniciales de flujo de IC-01-01, agua geotérmica en corriente A; agua de recirculación en corriente B.....	39
Fig. 22 Diagrama TQ de EA-01; superior, corriente de agua geotérmica; inferior, corriente de agua de circulación.....	40
Fig. 23 Diagrama y datos de flujo de bomba de agua de circulación .....	41
Fig. 24 Curva de desempeño preliminar BA-01-01 .....	43
Fig. 25 Diferentes lotes de piña deshidratada .....	46
Fig. 26 Piña deshidratada, de izquierda a derecha Miel, Cayena 2 y Esmeralda.....	51
Fig. 27 PCA de la comparación de olor y sabor para piña fresca y deshidratada .....	57
Fig. 28 Resultado del consenso de las siete muestras de piña.....	57
Fig. 29 Mapeo de PCA a partir del análisis de factores múltiples del instrumental y sensorial (apariencia y textura) en piña deshidratada .....	62
Fig. 30 Espacio sensorial de piña deshidratada, obtenido de Análisis de factores múltiples .....	62
Fig. 31 Destilado de agave y producción de vino; Invernadero para uvas y cebolla; Pasteurización de jugo de uvas; Deshidratado de cebolla y Secado de café y cerezas .....	67
Fig. 32 Deshidratación de mango, papaya, pera, piña y fresas; Producción de mango, papaya, pera, piña y fresas en invernaderos y Pasteurización .....	68
Fig. 33 Producción de diversas frutas y verduras en invernaderos .....	69
Fig. 34 Pasteurización para envasado aséptico de productos cárnicos en general y Pasteurización de huevo y leche.....	70
Fig. 35 Producción y productos derivados de la miel; Acuicultura para la cría de especies como atún, camarón, langosta y mojarra y envasado derivado de la producción de estos productos.....	71
Fig. 36 Tabla para la clasificación del nivel de maduración .....	72
Fig. 37 Evaluación sensorial de piña deshidratada por parte de jueces entrenados...	74
Fig. 38 Ducto diagonal de distribución de air; izquierda. - Modelo 3D para su simulación, Derecha. - Modelo real construido después de su validación .....	75

Fig. 39 Perfil del aire caliente en el interior del DGA 200. El ducto de distribución del  
aire caliente se ve en color rojo, siendo el resto el resto el espacio de deshidratado .76

Fig. 40 Mapeo térmico a lo largo de los diferentes espigueros (E1-E8) dentro del  
deshidratador .....78





## RESUMEN

La producción mundial de comida tendrá que aumentar en un 60% para 2050, un reto al que se le suman obstáculos o factores como el cambio climático, las consecuencias de las guerras y otros problemas globales como la desigualdad económica o la reciente crisis de las cadenas de suministro globales. En general, los obstáculos por venir en la producción de alimentos y garantizar servicios a una creciente población no serán pocos, pero tampoco son pocas las ideas con las que se hacen frente a este gran reto.

La deshidratación de alimentos es una técnica de preservación natural y este trabajo demuestra que es factible hacerlo con energía geotérmica, para lo cual se deshidrataron diferentes especies de piña (Miel, Cayena y Esmeralda) a diferentes temperaturas, desde 64 hasta 80 °C. Con la piña deshidratada se hicieron análisis microbiológicos, *mesófilos aerobios* (< 230 ufc/g), *coliformes* totales (< 0.3 s.m.), hongos y levaduras (< 120 v.e.) y *salmonella spp* (Ausente en 25 g). Se realizó una evaluación sensorial Perfil Flash modificado (PFm) con un grupo de jueces entrenados en metodología descriptiva, ya que se obtiene un mejor consenso de respuestas. Las piñas deshidratadas presentaron sabor: intenso, caramelizado y ácido, aroma: intenso, tostado y caramelizado, así como resabio amargo. También se hicieron análisis de textura y color instrumentales. Las muestras que presentaron coloraciones más amarillas, coincidentemente, tienen sabores intensos y al mismo tiempo ácidos y resabio amargo, lo que indica indirectamente la presencia de vitamina C como se sugiere en otras investigaciones. La textura fue un aspecto muy importante en el tema de la vida de anaquel, ya que hubieron muestras con fracturabilidad alta (mayor a 9.5 N) y al momento de envasarse se quebraban, pero aquellas con fracturabilidad media (7.9 N) conservaban mejor su forma. Por lo anterior, la temperatura adecuada para obtener coloraciones, fracturabilidad media, olores y sabores intensos un poco caramelizados y al mismo tiempo ácidos fue de 65 a 70 °C.

Los resultados pueden encontrar aplicación en la producción de fruta deshidratada que hacen asequible un suministro de alimentos para el futuro con cero emisiones de gases de efecto invernadero a una creciente población mexicana que se estima crezca a 130 millones de mexicanos para el año 2030.

## INTRODUCCIÓN.

El aprovechamiento y el uso eficiente de la energía, es un tema muy popular en lo que va de los últimos años a la fecha; por la crisis energética, el agotamiento de las principales reservas de petróleo, la creciente demanda energética en el mundo, las reformas a la ley en países como México, que hablan sobre los derechos a un ambiente sano, y finalmente pero no menos importante, el cambio climático.

La actual crisis de escases de alimentos y la inflación ponen en duda la seguridad alimentaria. El siglo pasado se consumía un 30% menos de la carne que se consume actualmente, y es América Latina la región con el segundo lugar en consumo, después de China.

Cuando producir 1 kg de carne equivale a consumir 9 kg de granos y 49 m<sup>2</sup> de tierra cultivable deja de tener sentido el desarrollo sostenible, ya que esto implica destinar tres cuartas partes del total de la superficie en el mundo a la producción de carne, o inclusive saber que un tercio de la producción acuícola se destina para hacer polvo como alimento de ganado son cifras que alarman ya que no está obedeciendo a una preocupación por el cuidado del medio ambiente, sobre todo cuando se siguen utilizando recursos energéticos tradicionales o no renovables.

El desarrollo sostenible se define como un proceso dinámico o un plan de acción o un mapa de ruta, para un estado futuro deseable para las sociedades humanas en las que las condiciones de vida y el uso de los recursos continúe satisfaciendo las necesidades humanas sin socavar la integridad, estabilidad y belleza de sistemas bióticos naturales. El aprovechamiento eficiente de los recursos a través del ahorro, y reutilización, brinda una oportunidad de desarrollo a cada ser humano de hacerlo libremente, en balance con la sociedad y armonía con el entorno; es decir, evitando la pérdida, cambio, deterioro, menoscabo, afección o modificación adversa del hábitat, ecosistemas, elementos y recursos naturales, de sus condiciones químicas, físicas o biológicas, de las relaciones de interacción que se dan entre éstos, así como de los servicios ambientales que proporcionan [1].

Por lo anterior se considera que un desarrollo sustentable se erige sobre tres grandes pilares, que trabajan en armonía para su génesis y todo con el objetivo de garantizar el

derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar.



*Fig. 1 Diagrama de Venn del desarrollo sostenible en la confluencia de los tres pilares que lo caracterizan*

A partir de las consideraciones anteriores, en México se ha detectado un área de oportunidad en el desarrollo de las actividades agroindustriales, a través de sustituir gradualmente los energéticos típicamente utilizados, por los procedentes de las renovables. Para el caso del consumo energético total en el país, en el 2018, el último registro que se tiene fue de 5,284 PJ, de los cuales el 32% corresponde al sector industrial. Es relevante mencionar este rubro en virtud de que los Usos Directos (UD) entran dentro de esta categoría, e incluso abarcan áreas del sector residencial con las Bombas de Calor Geotérmicas (GHP por sus siglas en ingles), agua caliente y/o generación eléctrica distribuida. Sin embargo, solo se hace especial énfasis en el área industrial que es donde entran los sistemas deshidratadores de alimentos.

La deshidratación de alimentos en el mercado nacional se hace a través de la quema de gas licuado, natural o carbón. Si bien no todo este consumo energético es exclusivo a la deshidratación, arroja una buena referencia sobre el tamaño de oportunidad. El

objetivo final sería reemplazar, por lo menos, el uso de carbón equivalente a 187 PJ y dejar de emitir 17.6 millones tonCO<sub>2</sub>.

Como sugiere el título de este trabajo, se inicia con un proyecto pequeño, que demuestre ser exitoso y fácil de replicar, con el objetivo de migrar poco a poco a un desarrollo sostenible. En el caso de México, su experiencia en este tema inició a partir de la Reforma Energética; en donde se permite la explotación del recurso energético a particulares para generación eléctrica y/o el desarrollo de proyectos en cascada de UD.

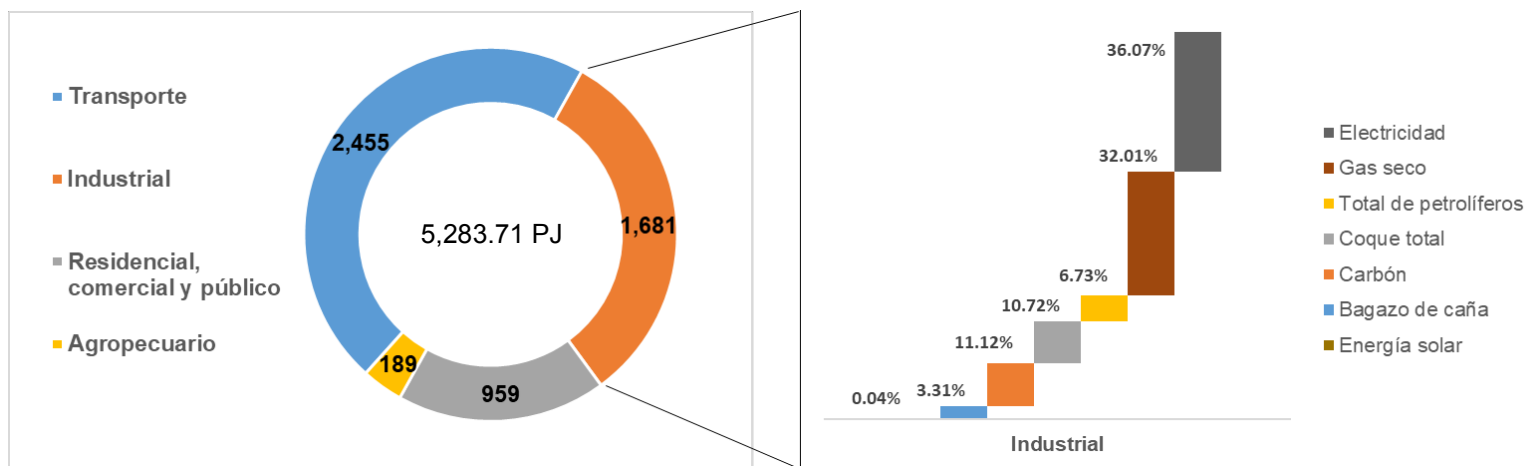


Fig. 2 Consumo Energético en México por sector, correspondiente al año 2018 en PJ [2]

En el mundo 820 millones de personas pasan hambre y se debe al desperdicio de un tercio de la producción mundial, de los cuales 8.6% corresponde a cereales y leguminosas, 21.6% frutas y verduras, 11.9% es carne y productos lácteos, 26.3% raíces, tubérculos y cultivos oleaginosos, 10.1% otros. Si estos alimentos se pudieran rescatar, serían suficientes para alimentar a 2,000 millones de personas [3, 4].

Del estudio de los países que deshidratan con energía geotérmica, la mayoría utilizan la energía remanente de un proceso previo; lo que se conoce como cogeneración, y para el desarrollo geotérmico local tiene muchos beneficios, entre ellos sociales. El aprovechamiento integral de los recursos, aceleran las tasas de retorno de inversión, disminuyendo el costo del energético, y en consecuencia también hay un aumento en las ganancias por el desarrollo de nuevos proyectos integrales. Sin embargo, la generación de empleos es el factor clave que permite integrar a las comunidades en el

desarrollo de la geotermia, dejando las puertas abiertas al desarrollo de proyectos más grandes como la generación eléctrica a gran escala.

El deshidratador geotérmico en México consume 13 TJ/año, equivalente al consumo de 2,125 Barriles de Petróleo Equivalente (BPE), 463 ton. de carbón, dejando de emitir 1,222 tonCO<sub>2</sub>/año. Sin embargo, las emisiones de CO<sub>2</sub> no solo se atribuyen a la sustitución de energéticos por otros, se estima que el 10% de las emisiones de GEI en el mundo corresponden al desperdicio de alimentos [5].

Finalmente, derivado de un análisis del impacto de este proyecto y los 17 objetivos de desarrollo sustentable publicados por la ONU, el DGA cumple con los siguientes: 2) Hambre Cero, 5) Igualdad de Género, 7) Energía asequible y no contaminante, 8) Trabajo decente y crecimiento económico y 13) Acción por el clima [6].



*Fig. 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible con los que cumple el proyecto de deshidratación geotérmica de alimentos*

## **OBJETIVOS:**

- Instalar, validar y caracterizar la tecnológica DGA 200 a partir de la deshidratación de piña, para escalar la tecnología a una producción tres veces mayor (planta deshidratadora DGA 600).
- Cuantificar el ahorro energético y económico para 0.5 MWt de capacidad instalada, así como la eliminación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), asociados al reemplazo del combustible, gas L.P., por energía geotérmica para la deshidratación de 150 a 200 kg de piña.
- Validar los parámetros operativos para la deshidratación de piña a través de análisis microbiológicos y sensoriales, con los cuales se garantiza su seguridad y calidad, respectivamente.
- Impulsar el aprovechamiento de la energía geotérmica en México y América Latina con la tecnología DGA 200, como punta de lanza, para el aprovechamiento de la energía geotérmica.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Establecer el marco teórico de la deshidratación geotérmica en el mundo.
- Hacer la selección de materiales y dimensionamiento de equipos principales, con base en los requerimientos de diseño y necesidades del proceso.
- Determinar las alteraciones fisicoquímicas en el alimento (piña como caso crítico de estudio), tomando como referencia la cinética de secado, a fin de mitigar dichas alteraciones para mantener la calidad nutricional y microbiológica.
- Definir las características deseadas en el alimento procesado (sensorial y microbiológicamente hablando), y con ello las condiciones operativas necesarias.
- Generar los parámetros de referencia para la valoración de la seguridad del producto con base en los estándares de calidad internacionales.

# 1 EL PAPEL DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA

## 1.1 Definición de energía geotérmica

La energía térmica procedente del interior de la Tierra, se manifiesta indirectamente a través del vulcanismo, los gradientes térmicos en el suelo, el desplazamiento de las placas tectónicas, emanaciones geotérmicas superficiales: lava, pozas de lodo hirviente, fumarolas, géiseres y aguas termales, sin embargo, pasa desapercibida a diferencia de la energía solar y eólica, es decir, la mayoría de las personas han interactuado con el sol y el viento, pero solo unos cuantos lo han hecho con el calor interno de la Tierra, aunado a que su origen no es tan evidente ni generalizado, porque se encuentra bajo tierra. Solo en zonas específicas se observan sus manifestaciones, por lo que se considera a la geotermia como una energía puntual.

La geotermia, como lo indica su origen etimológico de origen griego “geos” tierra y “thermos” calor, y como se explicó, se puede definir como el calor almacenado en el interior de la tierra. Su origen se asocia a cuatro fuentes:

- 1) Proto-Tierra: Etapa de formación del planeta Tierra hace 6.4 billones de años. La energía térmica generada se asocia a choques o impactos asociados a meteoritos que dieron forma al planeta. Posteriormente, se separan elementos pesados y ligeros para formar el núcleo, el manto y la corteza. El calor se conservó por el efecto aislante de la roca, y actualmente se manifiesta gradualmente hacia la superficie.
- 2) Radiogénesis: Elementos radiactivos como el uranio, torio, rubidio y potasio generan el 60% del calor de la corteza, donde están presentes en abundancia comparado con el manto porque sus grandes radios atómicos son menos compatibles con estructuras minerales de dicha capa terrestre, sin embargo, se estima que cerca de 47 MWt provenientes del manto son generados por radiogénesis.
- 3) Presión gravitacional: Similar a la Ley de Charles, donde se incrementa la temperatura de un gas por su compresión, sucede algo similar en los sólidos, salvo que el cambio en el volumen no es tan evidente como en los gases. El

calor se genera por la atracción gravitacional interna o la compresión de las rocas, acumulándose el calor en las profundidades.

- 4) Fricción en fallas sísmicas: Manifestación de calor local por la fricción a lo largo de fallas sísmicas; el calor generado es suficiente para fundir parcialmente la roca (pseudotaquilita). La mayoría de las centrales geotérmicas aprovechan la energía producida en estas fallas [7].

## 1.2 Usos Directos De La Energía Geotérmica

Los Usos Directos (UD) son aplicaciones para el aprovechamiento térmico en sectores residencial, comercial e industrial; donde anteriormente se utilizaba el calor procedente de quemar gas L.P., gas natural, leña, carbón u otro, sustituyéndolos por el calor de la tierra. La energía geotérmica se clasifica en tres grupos, alta ( $t > 200\text{ °C}$ ), mediana ( $90 \leq t \leq 200\text{ °C}$ ) y baja entalpía ( $30 \leq t < 90\text{ °C}$ ). Es importante mencionar que las escalas para media y baja entalpía pueden ser relativas, y lo anterior va en función de las temperaturas ambientes de cada región; para países muy fríos con temperaturas bajo cero, tener agua a  $10\text{ °C}$  del interior de la tierra se puede considerar geotermia, pero en regiones muy cálidas con temperaturas de hasta  $45\text{ °C}$ , pudiera no catalogarse como tal. Para cuestiones de desarrollo de proyectos geotérmicos de mediana y baja entalpía, habría que buscar en las normas legales de cada país, caso particular en México, se ha definido la energía geotérmica genéricamente como:

- I. Agua geotérmica: Agua propiedad de la Nación, en estado líquido o de vapor que se encuentra a una temperatura aproximada o superior a  $80\text{ °C}$  en forma natural en un yacimiento geotérmico hidrotermal, con la capacidad de transportar energía en forma de calor, y que no es apta para el consumo humano.

Del artículo 2, fracción I de la Ley de Energía Geotérmica, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de agosto de 2014, citado en [8]

A partir de esta definición, en México se regula y controla el uso del recurso. Actualmente es bien conocido el diagrama de Lindal en honor a Baldur Lindal [9, p. 35], quien documentó una serie de aplicaciones geotérmica en función de la cantidad de temperatura/entalpía del recurso, pero con el paso del tiempo se ha ido actualizando a la par de la evolución en las actividades industriales.



En busca de un aprovechamiento más eficiente de la energía de media y baja entalpía, se engloban una serie de UD que operan secuencialmente en el orden del nivel energético que requieren. Los primeros son los que necesitan más temperatura, después los de temperatura intermedia y finalmente los de temperatura baja, hasta extraer toda la energía térmica disponible, siendo la temperatura ambiente el límite inferior. Calidad y dirección de la energía son conceptos definidos por la segunda ley de la termodinámica y que se ejemplifican perfectamente a través de esta práctica denominada Usos en Cascada (UC), ver Fig. 4.

En el año 1995, solo 28 países aprovechaban la energía geotérmica; en el 2000, 58; 2005, 72; 2010, 78, 2015, 82 y finalmente en el 2020 la cifra reportada fue de 87, con la participación de Bolivia, Burundi, Chipre, Islas Feroe, Malawi, Malasia y Nigeria. Con este crecimiento en el aprovechamiento energético geotérmico (ver Tabla 1), el ahorro de energía es de 24.4 millones de Toneladas Equivalente de Petróleo (TEP) por año (167 millones de barriles), dejando de quemar 36 millones de ton. de carbón (96 millones de ton. de CO<sub>2</sub>)<sup>1</sup>. En todo el mundo hay 279 casos de UD, algunos de ellos integran todo un sistema de UC; la distribución de dichos UD se puede ver en la Fig. 5.

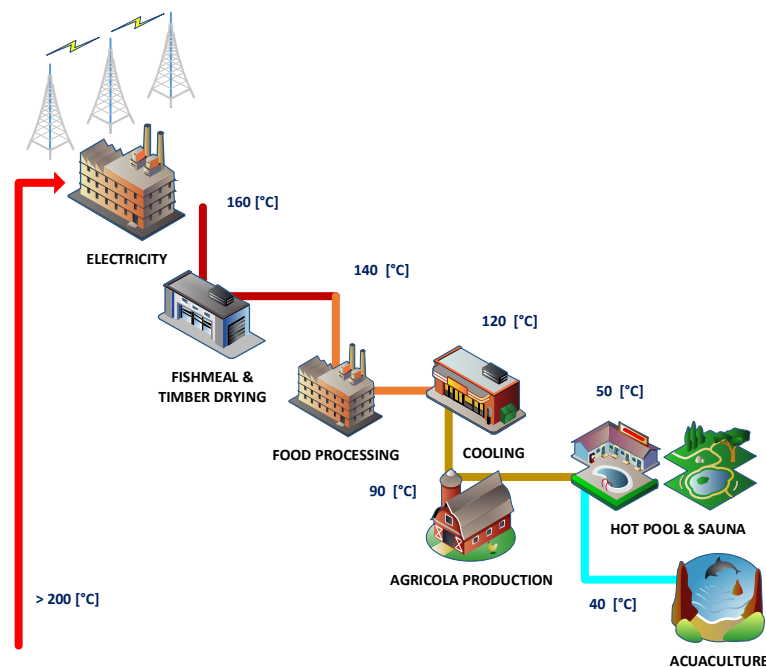


Fig. 4 Concepto de uso en cascada (elaboración propia)

<sup>1</sup> 1,020,887 TJ/año consumo de energía geotérmica en el mundo [11]; 1 TEP = 41,868 MJ [2]; 28.1 GJ/ton Carbón; Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la quema de carbón 94 tonCO<sub>2</sub>/TJ [106].

Tabla 1 Capacidad Instalada en TJ/año por aplicación desarrolladas en el mundo [10, 11]

CODIGO	Utilización	Capacidad MWt					
		1995	2000	2005	2010	2015	2020
<b>GHP</b>	Bomba de calor geotérmica	1,854.00	5,275.00	15,384.00	33,134.00	50,258.00	82,319.61
<b>H, &amp; D</b>	Calefacción de espacios	2,579.00	3,263.00	4,366.00	5,394.00	7,602.00	6,113.02
<b>G</b>	Invernaderos	1,085.00	1,246.00	1,404.00	1,544.00	1,972.00	9,124.37
<b>F</b>	Acuicultura	1,097.00	605.00	616.00	653.00	696.00	949.67
<b>A</b>	Deshidratación de alimentos	67.00	74.00	157.00	125.00	161.00	256.66
<b>I</b>	Usos industriales	544.00	474.00	484.00	533.00	614.00	852.77
<b>B</b>	Balneología	1,085.00	3,957.00	5,401.00	6,700.00	9,143.00	24,190.42
<b>C &amp; S</b>	Enfriamiento/Derretimiento Nieve	115.00	114.00	371.00	368.00	360.00	435.07
<b>O &amp; K</b>	Otros	238.00	137.00	86.00	42.00	79.00	110.99
<b>Total</b>		<b>8,664.00</b>	<b>15,145.00</b>	<b>28,269.00</b>	<b>48,493.00</b>	<b>70,885.00</b>	<b>124,352.58</b>

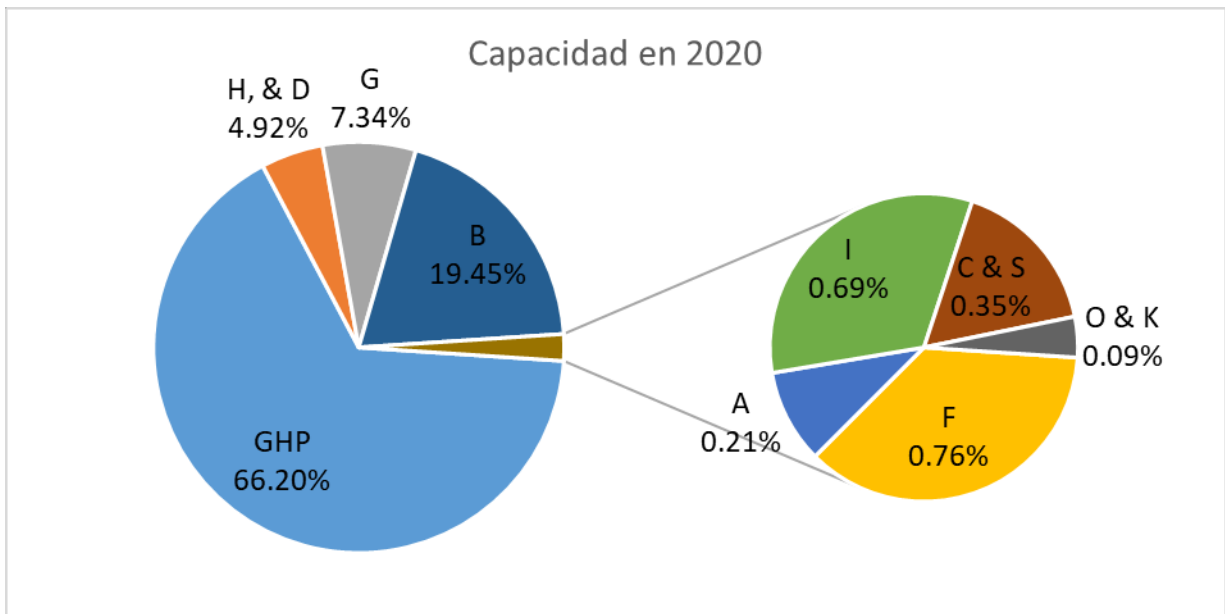


Fig. 5 Distribución de los UD en todo el mundo (capacidad en 2020). En total son 279 casos registrados

### 1.3 Usos industriales

A diferencia del acondicionamiento de espacios y actividades agrícolas, que no requieren de altas temperaturas, las actividades industriales sí lo requieren. Lund (1980), citado en [12], presenta un estudio sobre la relación de consumo energético de ciertas actividades y la cantidad de energía que se pudiera ahorrar al utilizar energía geotérmica, el ahorro varía en función de la temperatura del recurso potencialmente disponible, ver Tabla 2.

Las actividades pueden ser tan variadas, e incluso tan particulares como lixiviación de minerales o tierras raras<sup>2</sup>, extracción de metales (como el oro) [13], producción de hidrógeno verde [14], cultivo de hongos [15, 16], procesado de pulpa para fabricar papel [10, p. 25], secado de madera [17], secado de algodón [18, p. 2], producción de ron madurado “tropicalmente” en Inglaterra [19], secado de sustrato de horticultura con tierra para macetas [20], curtido de cuero e incluso acondicionamiento de espacios de servidores que se dedican al minado de criptomonedas<sup>3</sup> [21-23]. Actualmente los desarrollos con tendencias hacia los procesos de cogeneración y/o en la innovación en los procesos productivos se han estado desarrollando en aras de optimizar los recursos energéticos, agrícolas y en general recursos naturales.

*Tabla 2 Energía ahorrada para cada proceso industrial en función del rango de temperaturas al que se pueda acceder*

Aplicaciones Industriales	40 - 60 °C	60 - 80 °C	80 - 100 °C	100 - 120 °C	120 - 140 °C	140 - 160 °C	160 - 180 °C	180 - 200 °C	200 °C	250 °C
Empaquetado de Carne	NA	99.0%	100.0%							
Carnes preparadas	NA	46.2%	61.5%	100.0%						
Queso natural	23.0%	100.0%								
Leche líquida	NA	NA	100.0%							
Frutas y vegetales enlatados	NA	NA	22.7%	67.6%	100.0%					
Deshidratación de frutas y verduras	NA	100.0%								
Deshidratación de papa (granular)	NA	19.9%	40.0%	56.0%					100.0%	
Deshidratación de papa (copos)	NA	19.9%	40.0%	56.0%				100.0%		
Frutas y verduras congeladas	NA	NA	30.0%	100.0%						
Molienda de maíz húmedo	21.5%			36.4%	46.0%		84.1%		100.0%	
Alimentos preparados (pellets)	NA	NA	100.0%							
Secado de alfalfa	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100.0%	
Azúcar de remolacha	NA	7.4%	22.4%		95.4%					100.0%
Bebidas no alcohólicas	60.9%	100.0%								
Asserraderos y molinos de cepillado	NA	NA	NA	NA	NA	100.0%				
Alúmina	NA	NA	NA	NA	76.2%					100.0%
Jabones	NA	NA	0.6%						100.0%	
Detergentes	NA	NA	52.2%				99.9%		100.0%	
Bloques de hormigón (baja presión)	NA	100.0%								
Bloques de hormigón (autoclave)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100.0%		
Premezclado	100.0%									

<sup>2</sup> Recientemente, la extracción de minerales, especialmente el carbonato de litio grado batería, han desatado la nueva fiebre por el oro blanco en países como EUA [107], así como Bolivia, Chile y Argentina (donde está el triángulo del litio en Suramérica) [108] y no sería de esperarse que próximamente en México por la gran reserva de Litio en el estado de Sonora [109].

<sup>3</sup> El Salvador, se convirtió en el primer país en declarar el bitcoin como moneda de curso legal, y a un mes de este hito en el desarrollo del país inició el minado de la criptomoneda y dicha actividad es gracias a la energía geotérmica suministrada por LaGeo. El pasado 23 de enero del año en curso se anunció que el Salvador había pagado 800 millones de dólares más intereses en eurobonos. Con esta acción el presidente Nayib Bukele fustigó a quienes dijeron que El Salvador no podría cumplir con el pago de dicha deuda [118].

Tabla 3 Ejemplos de desarrollos industriales más representativos con energía geotérmica en el mundo

País	Ref.	Proyecto
Italia	[24-26]	Queserías, viveros y cerveza artesanal. <i>Vapori di birra</i> es una fábrica de cerveza que aprovecha la energía geotérmica. Sus dos cervezas características son: <i>Geyser</i> y <i>Solfurea e la Magma</i> , cada una con sus propias características y peculiaridades.
Islandia	[27]	Los flujos de agua caliente en Urriðavatn es la única agua caliente certificada para beber en Islandia, por lo que ha sido usada para producir una cerveza especial, así como té geotérmico.
Kenia	[28, 29]	Se está buscando el desarrollo de un parque industrial en Mai Mahiu, Naivasha, donde los proyectos capitales del gobierno ofrezcan alternativas en nuevos empleos y con actividades productivas que representen importantes ingresos en el estado. La empresa Geothermal Development Company (GDC) está probando prototipos para: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pasteurización de leche</li> <li>2. Invernaderos</li> <li>3. Acuicultura</li> <li>4. Lavanderías</li> <li>5. Secador de cereales.</li> </ol>
Nueva Zelanda	[30-35]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Imanaka (empresa japonesa) en asociación con un grupo de entidades maoríes, han creado la empresa Waiu Dairy (67% de las acciones pertenecen a 11 entidades maoríes y el 33% a la empresa japonesa). Su objetivo es producir 8 mil ton. métricas de leche en polvo con vapor geotérmico (4 a 6 ton/h a 16 Barg).</li> <li>2. La empresa <i>Oji Fiber Solutions</i> (OjiFS), es una fábrica de pulpa para papel reciclado en Tasman, Kawerau. Consume de 20 a 50 ton/h de vapor geotérmico a 12 Barg; con dicho proyecto se han reducido las emisiones de gases de efecto invernadero en 10 mil ton CO<sub>2</sub>/año.</li> </ol>

EUA	[36]	<p><i>The Klamath Basin Brewing Company</i> abrió sus puertas en 2005 después de renovar el edificio histórico Crameer Lake Cremery, está ubicada en Klamath Falls, Oregon. Actualmente se elaboran 10 diferentes cervezas.</p>
-----	------	---

La Fig. 6 tiene mayor sentido cuando se analiza la clasificación que hace Lindal, la cual fue adecuada al siguiente diagrama para ejemplificar la calidad energética requerida por cada proceso y su relación directamente proporcional a la profundidad a la que se encuentran dichos recursos, la cual se presenta de manera cualitativa, ya que como se mencionó al principio el gradiente térmico de cada región varía uno con otro.

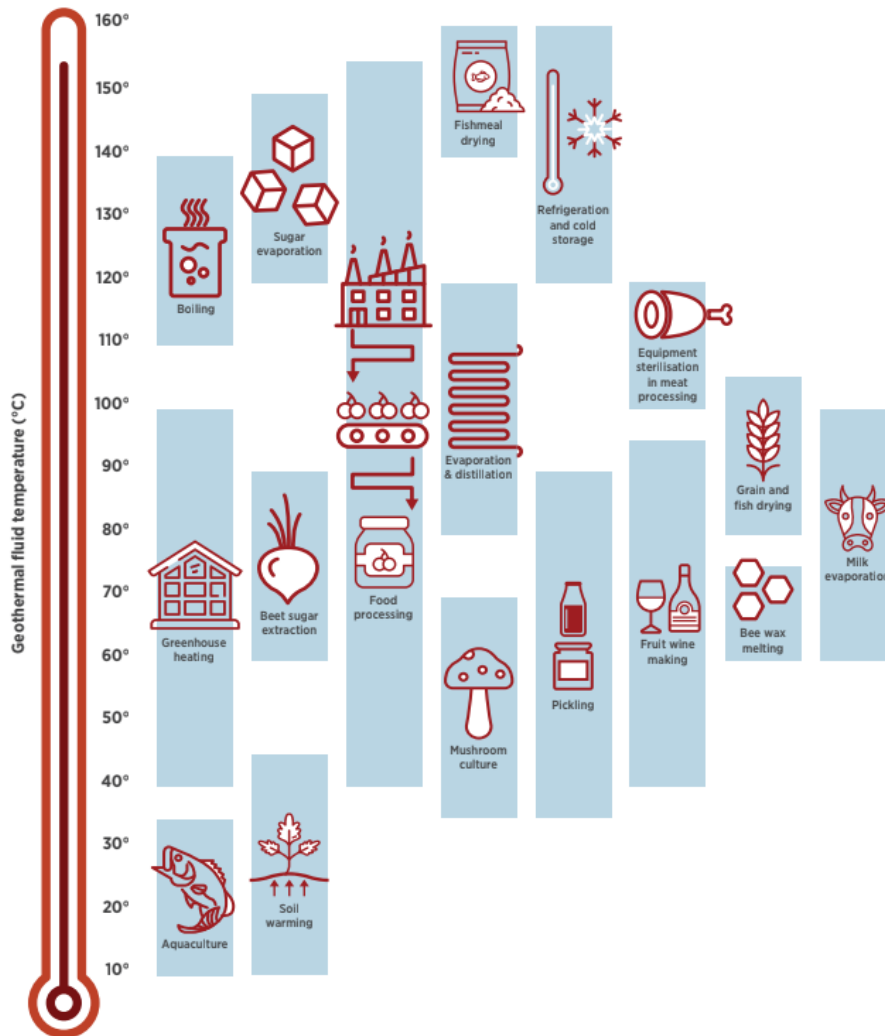


Fig. 6 Adaptación del diagrama de Lindal

Finalmente, otra manera de presentar las diferentes aplicaciones con energía geotérmica aplicada a los diferentes sectores comerciales en México se detalla en la Fig. 7, los cuales van desde la generación eléctrica tradicional, la generación eléctrica distribuida hasta los diferentes sectores reportados por la SENER [37].

#### **1.4 Suministro de alimentos**

Con el inicio del universo, desde un punto de vista filosófico, la generación de la entropía también comenzó. Hasta el siglo XIX, cuando Nicolas Leonard Sadi Carnot lo enunció por primera vez en su obra maestra titulada “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia”, es que se explica dicho fenómeno, y más tarde Willian Thomson declara que toda la energía generada en un trabajo no puede ser aprovechada completamente, formulando así la segunda ley de la termodinámica. Sin embargo, el concepto se ha extendido a otras áreas del conocimiento y actualmente se habla de la entropía en el medio ambiente e inclusive, en la sociedad.

La generación de entropía es un hecho que está presente en la vida cotidiana. Desde un punto de vista particular, el incremento de la población humana ha acelerado la generación entrópica en el medio ambiente, fenómeno que se ve reflejado en un serio problema que, se ha definido como calentamiento global producido en parte por la lentitud del proceso de recuperación de los ecosistemas que, se han desequilibrado por la constante actividad humana a una velocidad sin precedente en la explotación de los recursos naturales, pero que cada día que pasa parece llegar a un límite, el cual está impuesto por la cantidad de energía disponible, siendo los combustibles de origen fósil los primeros en agotarse.

Por otra parte entra en juego el concepto de sustentabilidad, el cual se puede definir como la garantía en mantener o mejorar la calidad de vida de las generaciones futuras; y al ser los Gases de Efecto Invernadero (GEI), una mezcla de sustancias que han acelerado dicho calentamiento global, se han destinado esfuerzos y recursos en mitigarlos al grado de tener economías neutras en GEI, o lo que se ha denominado descarbonización de la matriz energética de cada uno de los países que así se lo han propuesto. Por lo anterior, se han desarrollado tecnologías para el aprovechamiento de la energía del sol, el viento, maremotriz, corrientes marinas (undemotriz), producción

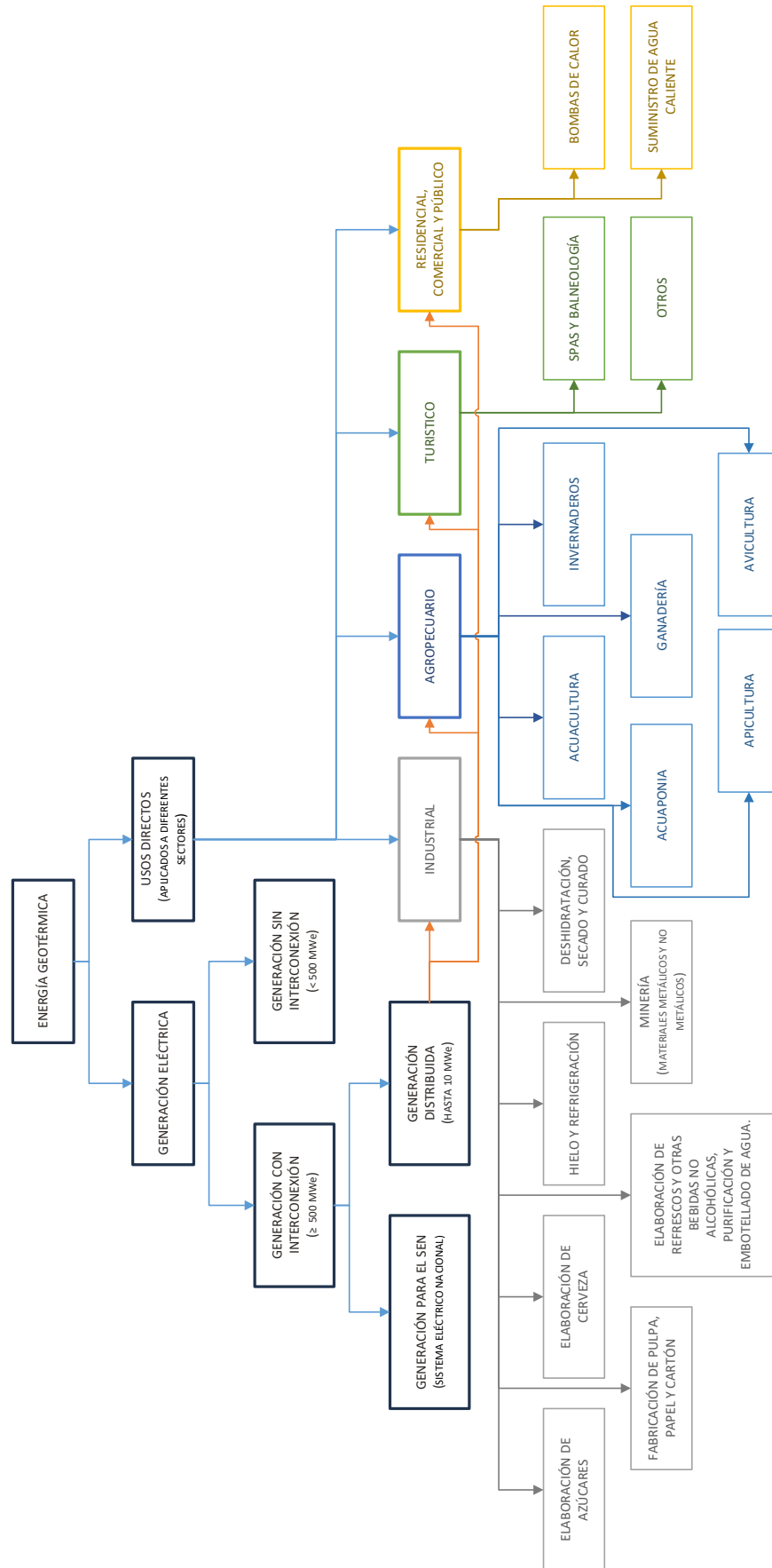
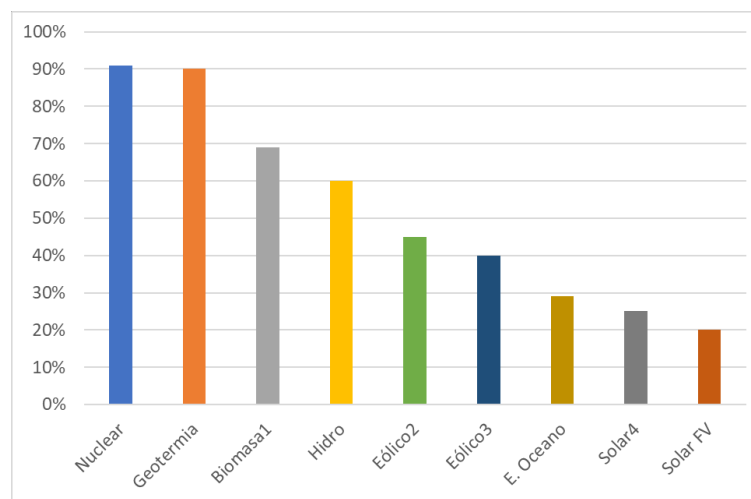


Fig. 7 Potencial de participación de la energía geotérmica por sector comercial en México

de hidrógeno verde, biocombustibles/biogas, geotérmica e inclusive una central de fusión nuclear<sup>4</sup>, sin dejar de lado los sistemas de almacenamiento energético híbridos.

La energía geotérmica es un recurso abundante en México, así como la solar, la proveniente del viento y maremotriz, sin embargo, el factor de planta es mayor en la energía geotérmica en comparación con las otras manifestaciones energéticas; es una energía renovable con un factor de planta, promedio en México, mayor al 62% [38]; sin embargo, en el futuro será clave armonizar todas las energías renovables para generación y almacenamiento energético, y de este modo garantizar un suministro constante y continuo, y aquí también juega un papel importante la energía geotérmica y con gran oportunidad para el desarrollo de nuevas tecnologías como los Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS por sus siglas en inglés), así como la recuperación y almacenamiento de energía en pozos petroleros abandonados y/o minas.

Cabe mencionar que los sistemas geotérmicos explotados actualmente, en su mayoría son sistemas hidrotermales y representan solo el 10% del potencial geotérmico en todo el mundo, por lo que detonar los EGS y lograr la extracción de calor directo del magma da la oportunidad de acceder a un 60% más de energía térmica proveniente del interior de la Tierra [7].



*Fig. 8 Factor de Planta de las renovables en México; 1) Biomasa (turbina lecho fluidizado circulante y turbina de vapor), 2) Eólico en costa, 3) Eólico en tierra, 4) Solar concentración termoeléctrica [39]*

<sup>4</sup> Actualmente, está en fase experimental y está siendo desarrollada por 35 países socios integrados por la Unión Europea, EUA, China, Japón, India, Corea del Sur, Reino Unido, Suiza y Rusia. El objetivo es que entre en funcionamiento en 2035 a pesar de los retrasos por la COVID-19 [110].



En México se tienen registro de más de 2,376 nodos geotérmicos y otros 739 más sin ser explorados [40]. Su aprovechamiento en México y en general, en América Latina se ha restringido a la generación eléctrica, sin embargo, recientemente se ha estado explorando el potencial que tiene en áreas como la producción de alimentos.

El Consejo Nacional de Población (2008), citado en [41], estima que para el año 2040, la población de México alcanzará una población de 123 millones de habitantes, lo que implica un aumento en la producción de servicios de vivienda, salud, energía eléctrica, agua potable y por supuesto, un suministro continuo de alimentos [42]. Este último punto, representa un enorme desafío en el sector agroalimentario, ya que la forma en que ha aumentado la producción en años anteriores ha contribuido significativamente al proceso del cambio climático, por lo que la búsqueda de estrategias productivas que minimicen los impactos negativos sobre el medio ambiente es de gran relevancia [43].

Por lo anterior, es importante explorar las oportunidades existentes concatenando los recursos energético y agroalimentarios para su aprovechamiento a través de UD, en cascada o en generación de centros de recursos geotérmicos como el más famoso en el mundo ubicado en Islandia [44]; y por esta razón se elaboró la Tabla 4, que relaciona los nodos geotérmicos ubicados por cada estado de la República Mexicana y 34 actividades agroindustriales que son susceptibles de desarrollarse completamente o parcialmente con dicho energético<sup>5</sup>.

Los estados con mayor oportunidad de desarrollo son Jalisco con 530 puntos geotérmicos con un potencial de desarrollo de 88%; en segundo lugar, Michoacán con 168 puntos calientes y 71%, seguido por Guanajuato, 201 puntos y 44%, Sonora, 155 y 47%, Nayarit, 145 y 32%<sup>6</sup>.

Particularmente hablando, la deshidratación de alimentos con la tecnología DGA 200, se alinea con los objetivos de sustentabilidad de la ONU con un impacto positivo al mejorar la calidad de vida en las comunidades rurales, que es donde están los principales recursos geotérmicos y alimenticios para su procesamiento. Derivado de un análisis del impacto de este proyecto y los 17 objetivos de desarrollo sustentable

---

<sup>5</sup> En el Apéndice se anexa la tabla con la información detallada de las 34 actividades y su producción por estado en toneladas

<sup>6</sup> Los datos presentados se elaboraron a partir del análisis de la información presentada en el Apéndice. Su proyección se basa en las actividades agroindustriales más comunes para el desarrollo de UD, pero esto no lo limita a cualquier otra actividad que pueda beneficiarse del calor.

publicados por la ONU, el DGA cumple con los objetivos No 2) Hambre Cero, 5) Igualdad de Género, 7) Energía asequible y no contaminante, 8) Trabajo decente y crecimiento económico, y 13) Acción por el clima [6].

*Tabla 4 Anomalías geotérmicas ubicadas por estado y el potencial de desarrollo; Tabla elaborada con los datos reportados por Iglesias et al. (2015), citado en [40]*

Estado de la Rep. Mexicana	No. Anomalías	Potencial de desarrollo
Aguascalientes	67	21%
Baja California	80	38%
Baja California Sur	41	26%
Campeche	---	15%
CDMX	1	24%
Chiapas	33	41%
Chihuahua	86	18%
Coahuila	25	18%
Colima	5	29%
Durango	66	24%
Estado de México	16	9%
Guanajuato	201	44%
Guerrero	10	32%
Hidalgo	123	15%
Jalisco	530	88%
Michoacán	168	71%
Morelos	10	24%
Nayarit	145	32%
Nuevo León	12	12%
Oaxaca	4	38%
Puebla	26	62%
Querétaro	244	15%
Quintana Roo	---	9%
San Luis Potosí	73	21%
Sinaloa	37	47%
Sonora	155	44%
Tabasco	---	12%
Tamaulipas	7	9%
Tlaxcala	2	15%
Veracruz	12	50%
Yucatán	---	26%
Zacatecas	89	32%
<b>TOTAL</b>	<b>2,268</b>	

## 2 DESHIDRATADOR GEOTÉRMICO DE ALIMENTOS, DGA 200

### 2.1 Introducción

La deshidratación con energía geotérmica permite modificar el contenido de agua en cereales, tubérculos, cultivos oleaginosos, vegetales, especias, cacao, café, frutas y plantas medicinales para incrementar su vida de anaquel y en consecuencia dotarlos de un valor agregado; mientras que el uso de energía geotérmica, permite la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociados directamente al reemplazo de los combustibles de origen fósil que los generan, así como por la reducción del desperdicio de alimentos, ya que la FAO (2021), citado en [5], estima que del total de los GEI emitidos en todo el mundo, el 10% corresponde al desperdicio de alimentos.

En la Tabla 5 se presenta una recopilación de los países que usan la energía geotérmica para producir alimentos deshidratados. Sin embargo, en esta investigación no se encontraron reportes detallados de la calidad y seguridad que tienen los alimentos producidos con esta tecnología; y justo también, este es otro de los objetivos que tiene este trabajo.

Los diseños de cada sistema varían, principalmente, en proporción y la mayoría son sistemas modulares experimentales. El DGA 200, es un sistema con una capacidad semiindustrial y el primero en su clase en México, el cual se caracteriza por ser un deshidratador de charolas, de aire caliente con flujo axial, y con un proceso que puede ser continuo o por tandas. A pesar de la gran variedad de deshidratadores que hay en la industria, cerca del 85% son directos, con rangos de calentamiento entre 50 y 400 °C (por supuesto, esta es información general y la temperatura no sube tanto para los productos alimenticios) [45].

Tabla 5 Resumen de la deshidratación con energía geotérmica en el mundo 2019

País	Ref.	Producto	MWt	TJ/año
China	[46]	Granos, frutas y vegetales	179.00	2,145.00
Islandia	[9]	Algas Marinas y pescado	70.00	910.00
Hungría	[47]	Chícharo, maíz y arroz	25.00	297.00
EUA	[48]	Ajo y Cebolla	6.45	97.50
Rumania	[49]	Hortofrutícola	6.32	12.70
Rusia	[50]	Hortofrutícolas y lana	4.00	69.00
El Salvador	[51]	Piña, manzana, coco y plátano	1.70	21.10
Turquía	[52]	Hortofrutícolas	1.50	50.00
Serbia	[53, 54]	Trigo y otros cereales	0.97	26.87
Guatemala	[55]	Plátano, mango, piña, pera y manzana	0.50	12.10
Kenia	[56-58]	Flores, granos y frutas	0.30	9.90
Grecia	[18, 59]	Pimientos, cebollas, hongos, aceitunas, espárragos, higos, manzanas, cerezas, jitomate y spirulina	0.24	4.75
Vietnam	[60]	Plátano, coco, mandioca y hierbas medicinales	0.50	11.80
Tailandia	[61-63]	Tabaco, plátano, maíz y cacahuete	0.04	0.30
Indonesia	[64, 65]	Té y chocolate.	NM	NM
Nueva Zelanda	[66]	Alfalfa.	NM	NM

## 2.2 Localización del proyecto

La ejecución del proyecto DGA 200 se desarrolló en el Campo Geotérmico Domo San Pedro, central geotermoeléctrica localizada en la Carretera Federal #15 Chapalilla-Compostela, km 12.5, s/n, C.P. 63800, Municipio de San Pedro Lagunillas, Nayarit, México. Coordenadas UTM: x=603932.76, y=2322472.69 en la zona 13.

## 2.3 Descripción del Proceso

Para su funcionamiento, el módulo DGA 200, requiere un suministro energético, dicho requerimiento será proporcionado por el agua separada en el separador ciclónico RSC-51-003, contenida en el tanque RTA-51-003 y conducida por la línea de tubería 250-B-51-009-AT hacia el silenciador RSM-51-001. El recurso geotérmico disponible en esa línea es de 50 ton/h a las mismas condiciones de saturación del vapor separado a 170 °C. Para obtener el recurso geotérmico fue necesario una obra de toma (ver Fig. 9) para

la interconexión y derivación de una nueva tubería que conduzca el fluido geotérmico hacia la zona de deshidratación.

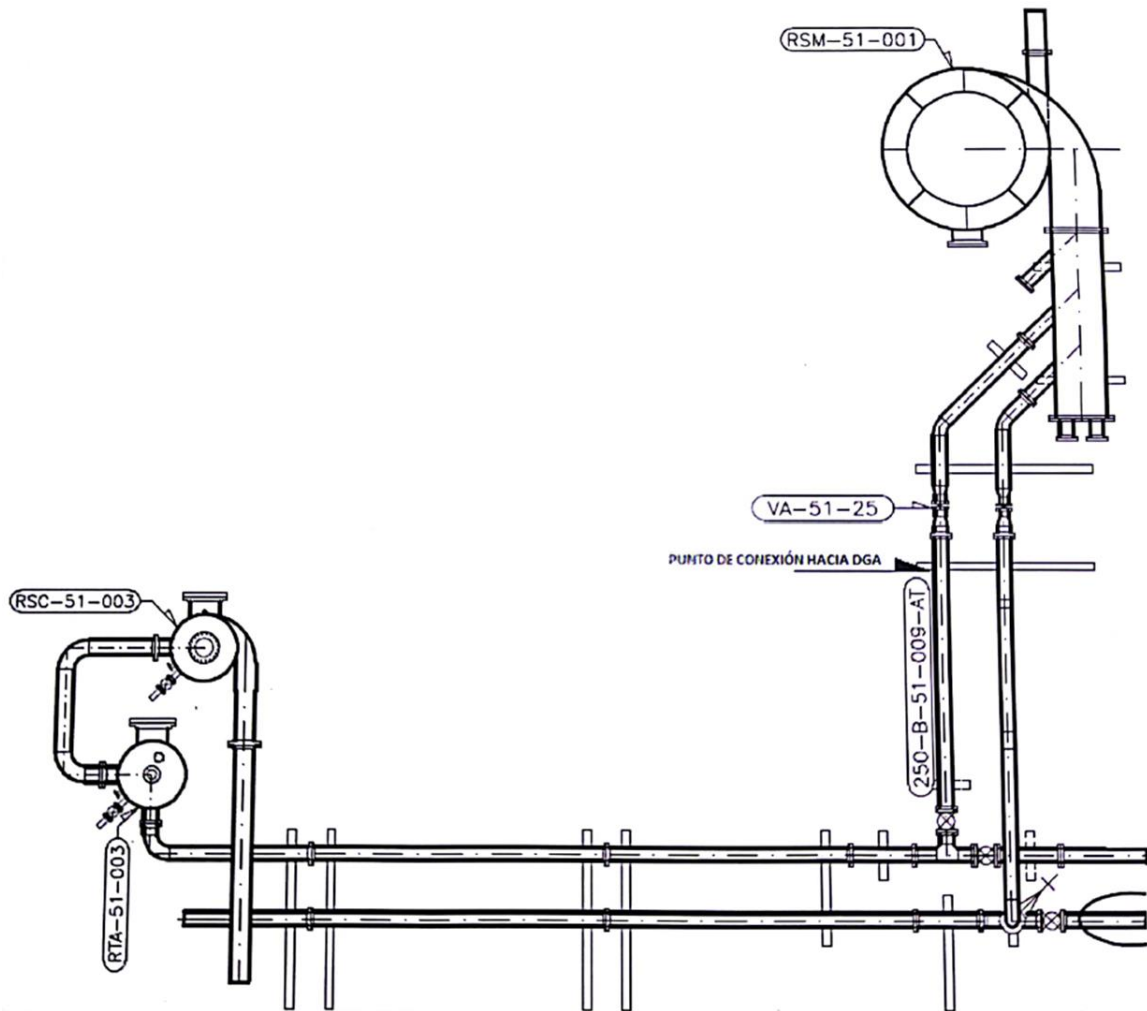
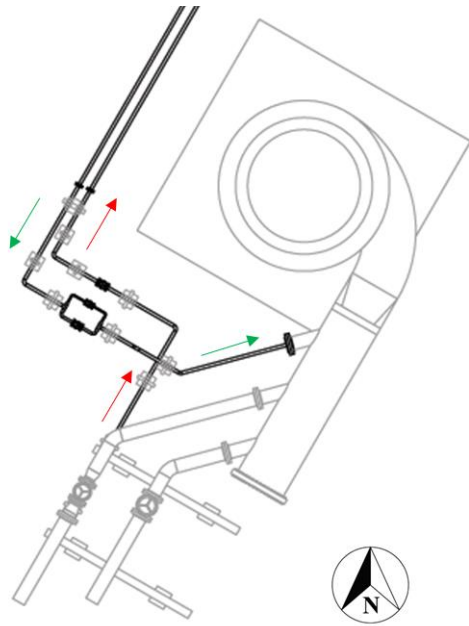


Fig. 9 Punto de interconexión de recurso geotérmico hacia DGA 200

### 2.3.1 Obra de toma

El sistema de obra de toma se define como: *La estructura que sirve para extraer el agua geotérmica presente en la superficie (emanaciones geotérmicas naturales), subterráneas o industriales*, siendo esta última las ya existentes asociadas a un desarrollo geotérmico anterior, caso particular el de la Geotermoeléctrica DSP, en Nayarit, México, la cual cuenta con plataformas de separación, y es justo en la plataforma No 2 que se utilizó el separador ciclónico **RSM-51-001** como obra de toma.



*Fig. 10 Izquierda. - Línea de toma desde la PS02; línea hacia proceso (flechas rojas), y retorno del fluido geotérmico (flechas verdes). El sistema cuenta con un juego de diferentes válvulas que facilitan la regulación de los niveles del agua en la plataforma; Derecha. - Instalación real en sitio*

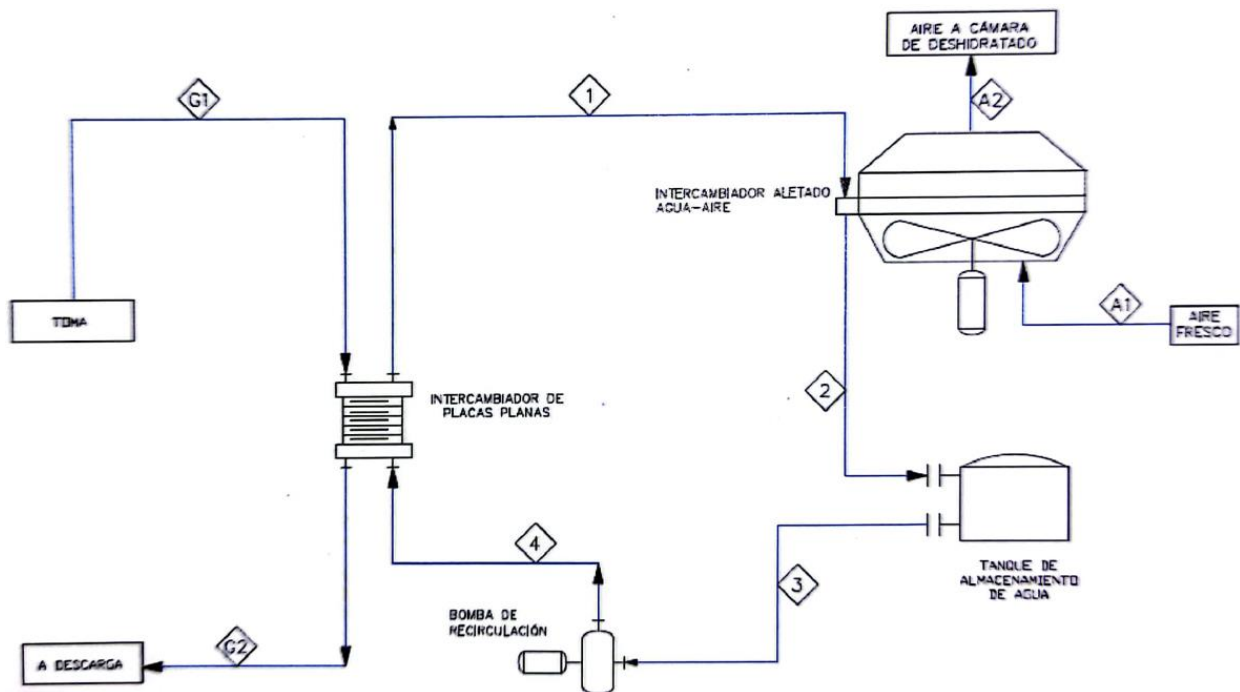
El flujo próximo a la separación tiene una presión de 9.9 Bar, temperatura de 180 °C y un caudal disponible de 20.8 kg/s, de los cuales sólo se utiliza el 8% para alimentar el DGA 200. Las condiciones fueron ideales para el desarrollo del proyecto; el trabajo en cuestión fue hacer dos derivaciones, una de extracción y otra de retorno del fluido (Fig. 11).



*Fig. 11 A partir de una línea ya existente de vapor, se hizo una pequeña toma para alimentar al DGA 200*



En el siguiente DFP, caracterizado por su representación gráfica simple a partir de la representación solo de los equipos principales, se describe el proceso o principio básico de funcionamiento del sistema deshidratador geotérmico. El recurso geotérmico (G1) dispuesto en la zona de interés cede una fracción de su energía en el equipo intercambiador de placas para posteriormente ser enviado a descarga (G2). Por otro lado, una bomba de recirculación envía una corriente de agua (4) hacia el intercambiador en donde el recurso geotérmico cedió energía. El agua caliente (1) continua su recorrido hacia un segundo intercambiador de tubos aletados (tipo radiador) para ceder su energía al flujo de aire (A1) que ingresará a la cámara (A2) donde se lleva a cabo el proceso de deshidratación. Posteriormente, el agua regresa (2) a un tanque de almacenamiento que suministra el agua requerida (3) por la bomba de recirculación e iniciar el proceso nuevamente, ver Fig 11.



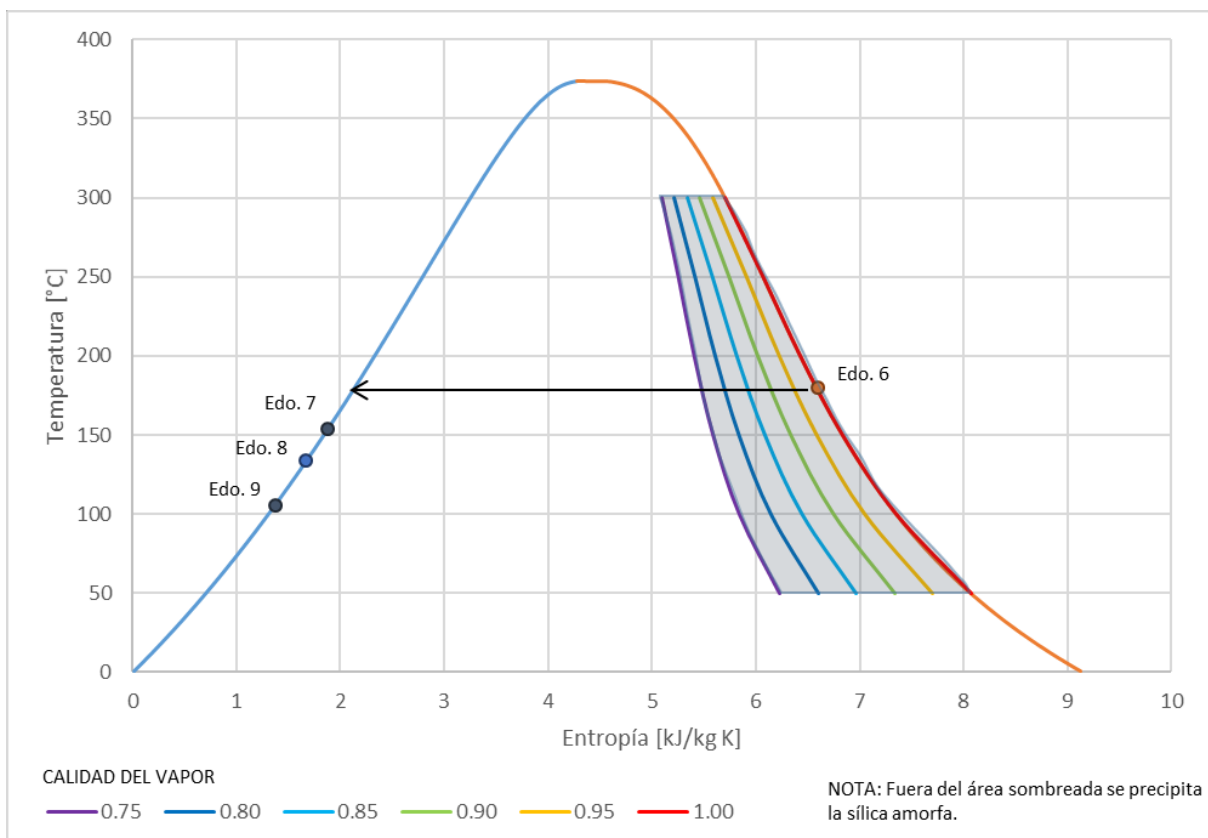
*Fig. 12 Diagrama de flujo de proceso de módulo DGA 200*

### 2.3.2 Sistema de intercambio de calor

Al momento de hacer la instalación, el sistema de deshidratación quedó integrado por tres intercambiadores de calor de placas (HPE por sus siglas en inglés) de tipo chevron, los cuales se renombraron como EA-01A, EA-01B y EA-01C, ver Fig. 14. Cada una de las diferentes líneas tiene un número asociado el cual identifica su estado termodinámico.

La medida de intercambio de calor con los HPE se tomó con base en el análisis de la composición química del agua. Es bien sabido los problemas de incrustación y precipitación en los equipos y tuberías que trabajan con agua geotérmica. La sílice es el principal mineral incrustante, se presenta como especie disuelta en todos los líquidos dominantes de los recursos geotérmicos. Los fluidos geotérmicos ascendentes disuelven  $\text{SiO}_2$  de las formaciones rocosas y alcanzan la saturación con respecto al cuarzo en sistemas acuosos a altas temperaturas. Las soluciones hidrotermales contienen cantidades significantes de  $\text{SiO}_2$  particulado y ácido silícico ligeramente corrosivo ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) y la condensación tiene lugar mediante la formación de enlaces químicos Si-O-Si.

A partir de los datos presentados por Gunnlaugsson et al (2014), citado en [67], que relaciona la pérdida de vapor en el fluido geotérmico, en el diseño de plantas geotermoeléctricas se adaptaron al diagrama de Mollier y se analizaron los estados termodinámicos de los HPE, ver Fig. 13.



*Fig. 13 Diagrama de Mollier; El área sombreada representa la zona libre de incrustaciones; Están representados los estados termodinámicos del fluido geotérmico (Fig. 14)*



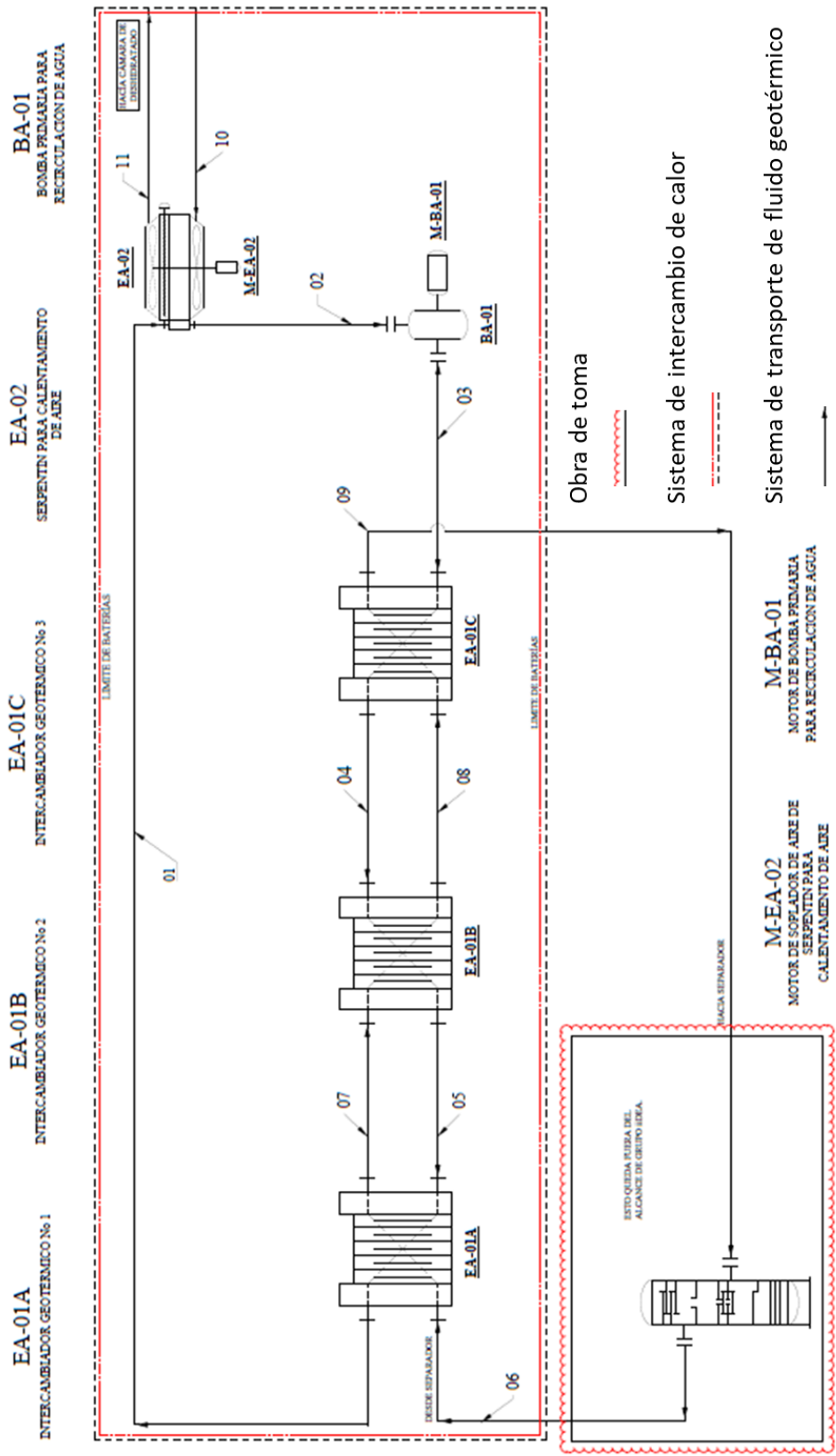


Fig. 14 Diagrama de Flujo de Proceso del Sistema Deshidratador Geotérmico de Alimentos DGA 200

A partir de la información anterior, se verificó que la precipitación se presentaría en los sistemas de intercambio de calor, HPE, por lo que se justifica el uso de este tipo de intercambiadores de calor. Su fácil mantenimiento y cambio de las placas permite que los paros por mantenimiento sean cortos.



*Fig. 15 Termografía del HPE y placa tipo chevron después de entrar en contacto con el agua geotérmica y después de un proceso de limpieza*

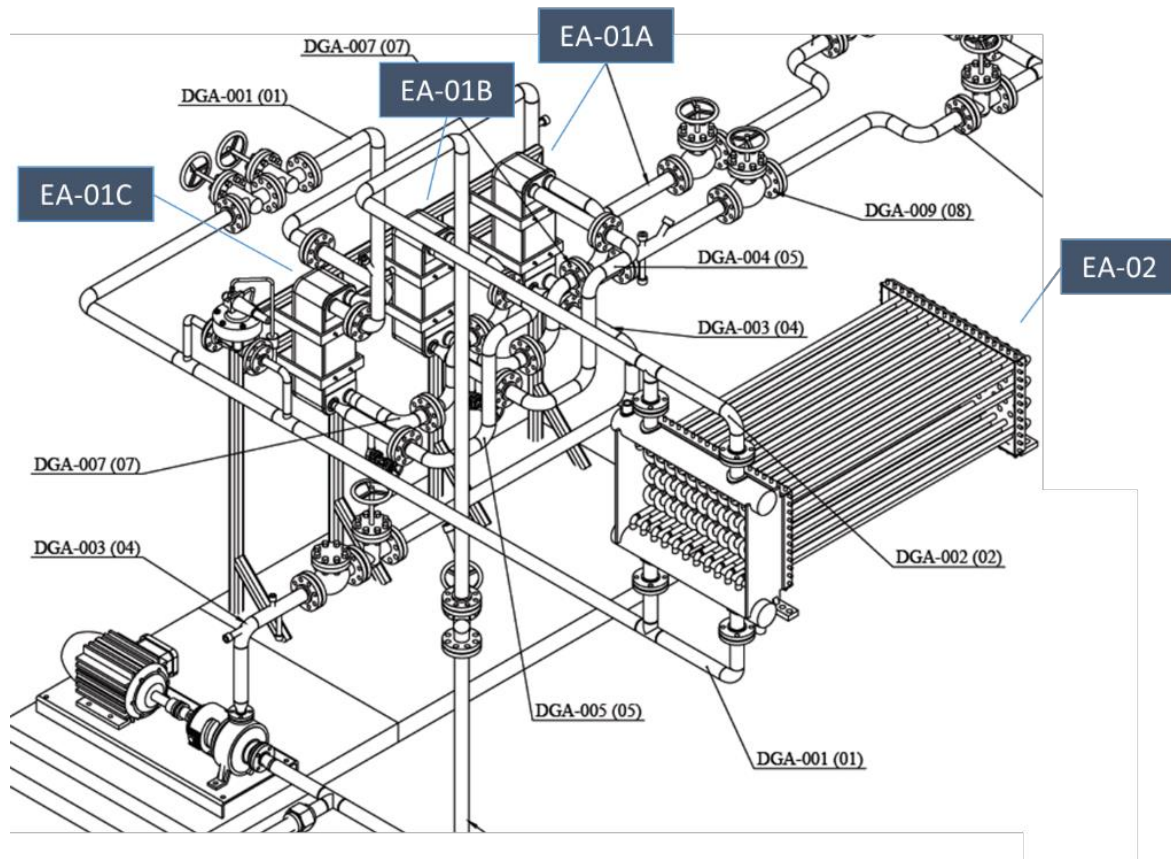
El intercambiador de calor EA-02 (tipo radiador), es un intercambiador agua-aire, ver Fig. 16. Una vez que el agua de toma común extrae la energía térmica del fluido geotérmico, se dirige al radiador, calentando el aire de 23 a 70 °C, inclusive puede llegar hasta los 90 °C, pero se regula para no afectar en los nutrientes del alimento.

### **2.3.3 Descripción del sistema deshidratador**

El DGA 200 tiene una capacidad de producción de 150 a 200 kg secos por día, y está diseñado sobre la estructura de un contenedor marítimo estándar (6.1 x 2.4 x 2.6 m), con un peso de 2.3 toneladas y una capacidad de carga de hasta 3 toneladas de producto fresco.

El sistema de intercambio de calor agua-aire, está ubicado al principio del ducto de distribución de aire, el cual está diseñado para garantizar la distribución del aire de manera homogénea al interior de la cámara y mantener una velocidad constante de 2 a 3 m/s El caudal del aire calculado para el deshidratado de piña<sup>7</sup> de hasta 12.3 kg/s a una temperatura promedio de 70 °C.

<sup>7</sup> Se diseñó tomando como referencia la piña, ya que es un producto que demanda la mayor cantidad de energía térmica. Si bien no es el alimento con mayor cantidad de humedad (85% HR), en comparación



*Fig. 16 Isométrico de conexión, HPE (EA-01A, EA-01B y EA-01C) y EA-02*

El contenedor se modificó para cumplir con los estándares de calidad e inocuidad en los alimentos; por lo que se recubrió el interior con lámina de acero inoxidable 304L cal. 16 (1.52 mm de espesor). En el piso se colocó pintura epóxica resistente a la abrasión y altas temperaturas (hasta 120 °C), es importante que no contenga sustancias químicas en la película seca, consideradas por las USDA peligrosas en caso de contacto accidental con alimentos. El acabado se dejó lizo y con una pendiente del 2% para no acumular agua cuando se lave. En su diseño se evitó en la medida de lo posible ángulos de 90° y superficies horizontales que acumulan polvo, lo anterior en apego a las normas dictadas por la European Hygienic Engineering & Design (EHEDG).

El ducto de distribución de aire caliente es diagonal, y tiene accesos ubicados estratégicamente, con el objetivo de suministrar aire caliente moderada y

---

con el jitomate (95 a 98% HR), sí es uno de los que más azúcar o sólidos disueltos tiene, lo que hace difícil la migración del agua a través de los tejidos capilares.

controladamente. Permitiendo que el resto del aire se distribuya en el fondo de la cámara. Para las dimensiones del equipo y el estudio de la dinámica del aire, se determinó que el ángulo del ducto diagonal fuera de  $5.67^\circ$ , ver Fig. 17.

### 2.3.4 Sistema de transporte del fluido geotérmico

El sistema de transporte se refiere al sistema de tuberías que canalizan el fluido geotérmico hacía el primer sistema de intercambio de calor y de regreso a la obra de toma (estados termodinámicos 6, 7, 8 y 9). La segunda parte del sistema de transporte es el que conecta la salida de los HPE hacía el segundo intercambiador de calor y de regreso (estados termodinámicos 1, 2, 3, 4 y 5). Las especificaciones de las tuberías deben ser las adecuadas para fluidos calientes, presurizados, corrosivos y altamente incrustantes.

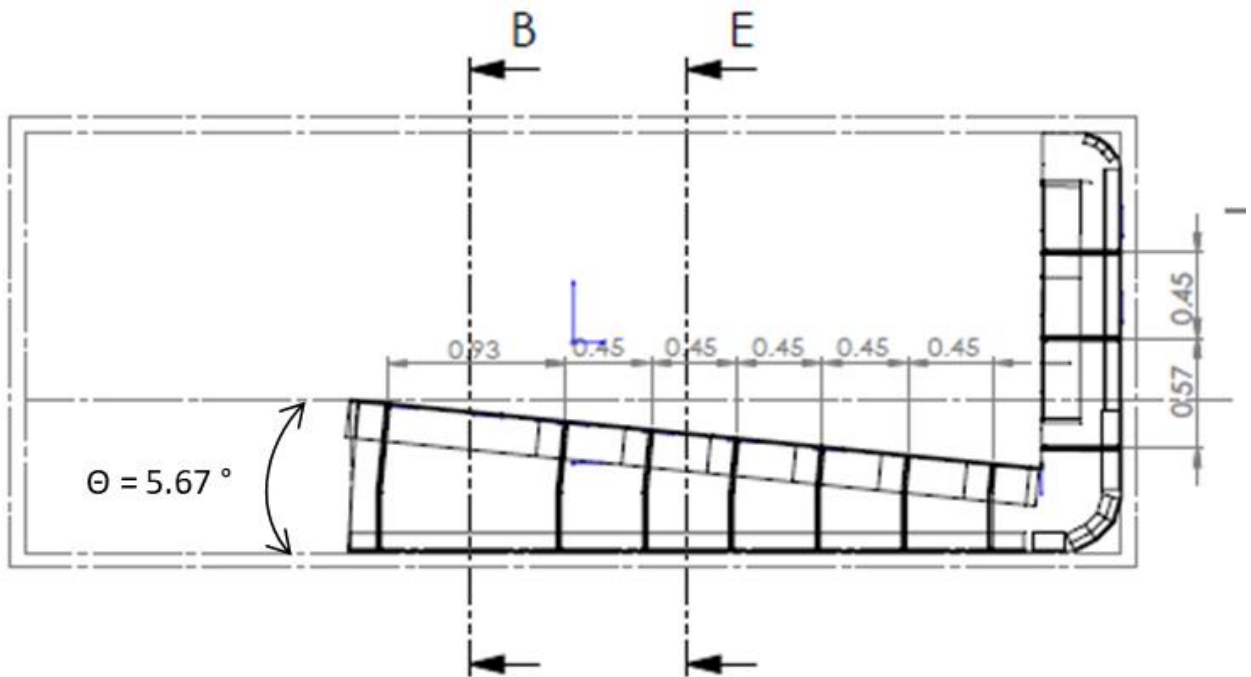


Fig. 17 Diseño diagonal del distribuidor de aire

Los criterios de diseño se basaron en Normas de Referencia (NRF) utilizadas por Petróleos Mexicanos<sup>8</sup> (PEMEX) y normas ASTM y ASME, entre otras. Para el tipo de servicio, salmuera, se utilizó acero al carbón clase 150, con tolerancia a la corrosión de 6.3 mm (0.250 in)<sup>9</sup>, límite de presión 1.55 MPa, radiografiado a juntas soldadas 5%.

## **2.4 Selección de materiales para equipos y tuberías**

### **2.4.1 Método de selección de materiales**

La selección de materiales para equipo o diseño en general conlleva un proceso de evaluación de varias opciones que cumplan los requisitos y especificaciones deseadas. Debido a la complejidad que tiene encontrar un material ideal, se pueden usar distintos métodos para realizar esta selección.

Los métodos para dicha selección se hacen a partir de considerar las propiedades físicas y químicas que pueden repercutir en la microestructura. Algunas propiedades para considerar son:

- Densidad
- Módulo de elasticidad
- Punto de fusión
- Corrosión
- Dureza
- Ductilidad
- Tenacidad
- Impacto
- Resistencia a la tracción
- Soldabilidad
- Maquinabilidad

Sin embargo, el costo llega a ser el factor determinante en la selección de materiales, esto no quiere decir que los análisis previos no sean de utilidad, por el contrario, permiten dar una guía que permita comparar diversos materiales y con base en ello comparar costos y beneficios.

Los principales métodos de selección son el método tradicional, método gráfico y método con ayuda de bases de datos. A continuación, se definen cada uno.

---

<sup>8</sup> Actualmente por la Reforma Energética en México, ya no existen más la NRF de PEMEX, solo se limita a las Especificaciones Técnicas emitidas por el *Grupo para la Emisión de Estándares Técnicos de los Bienes y Servicios que contraten PEMEX* y sus Empresas Productivas Subsidiarias (EPS).

<sup>9</sup> La corrosión permisible para a tubería de diámetro menor o igual a DN 50 (NPS 2) se debe considerar igual a 0.0 mm

### **Método tradicional.**

En este método se usa la experiencia de materiales seleccionados con anterioridad y donde sus aplicaciones sean similares a las que se tienen actualmente. El haber empleado un material previamente da la certidumbre de que ha sido el adecuado para cumplir las especificaciones deseadas. También, la disponibilidad o accesibilidad de estos materiales seleccionados dan la confianza que el diseñador necesita para considerarlo una opción viable.

### **Método gráfico.**

El método gráfico emplea los diagramas de Ashby, los cuales son generados mediante un software de diseño que pide al diseñador las propiedades deseadas en el material y que son especificaciones propias del diseño o equipo a seleccionar o manufacturar. Debido a que sólo considera especificaciones propias del proyecto, no considera factores como la disponibilidad de materiales o las posibles aleaciones que el software puede seleccionar. El criterio del diseñador es primordial para interpretar los resultados que arroje el programa.

En los diagramas de Ashby se pueden tener familias de materiales cuyas propiedades presentan variaciones, lo cual genera zonas o campos que cumplen ciertas condiciones que hacen que estos materiales puedan ser seleccionados.

Una ventaja de este método es la cantidad de parámetros que se pueden considerar en la selección de materiales, como por ejemplo el tipo de impacto ambiental que implica su utilización.

### **Método con ayuda de bases de datos.**

Este método resulta ser el más empleado debido a la disponibilidad que hay en internet acerca de los materiales, sus propiedades y principales aplicaciones. Actualmente las bases de datos más importantes son las que provienen de la ASTM – American Society for Testing and Materials-, la SAE -Society of Automotive Engineers-, la ASM -American Society for Metals-, la AISI -American Iron and Steel Institute-, NASA -National Aeronautics and Space Administration-, entre otras.

Este método requiere el previo conocimiento de las propiedades y comportamiento de ciertos materiales para lograr una selección adecuada de materiales usando como

herramientas las bases de datos, de lo contrario la selección de materiales podría resultar deficiente y hasta llegar a provocar fallas por emplear los materiales no adecuados para el diseño.

La selección de materiales se enfoca en la selección de las mejores opciones para materiales de dos equipos: un intercambiador de calor de placas y un intercambiador de tubos aletados. Las condiciones de operación para los equipos se presentan en la Tabla 6.

*Tabla 6 Condiciones de operación de los equipos*

<b>Intercambiador de calor</b>	<b>Fluido de trabajo</b>	<b>Presión [Barg]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Placas tipo chevron	salmuera-agua	7.2	166
Tubos aletados	Agua-aire	4.3	120

Los fluidos de trabajo son: salmuera geotérmica, agua potable y aire.

Los materiales y equipos deben ser adecuados para el servicio continuo dentro de un entorno corrosivo que ataca cobre, bronce y plata.

Los siguientes materiales no deben utilizarse, a menos que se especifique lo contrario.

- |   |                |
|---|----------------|
| 1. Asbesto, en cualquier forma                            | 2. Cadmio      |
| 3. Cobre y aleaciones de cobre                            | 4. Plata       |
| 5. Cromos   | 6. Cuproníquel |
| 7. Acero al carbono recubierto de zinc electro-depositado |                |

Por el contrario, los materiales que se muestran a continuación pueden seleccionarse para el diseño de los intercambiadores de calor y otros equipos principales, como los que integran el sistema de bombeo:

- |                         |              |
|-------------------------|--------------|
| 1. Acero inoxidable     | 2. cPVC      |
| 3. Aleación de aluminio | 4. Hastelloy |

- |  |  |
|--|--|
| 5. Plásticos ABS   | 6. Polietileno de alta densidad (HDPE) |
| 7. Acero bajo en carbono, liso o galvanizado   | 8. Polietileno reticulado (XLPE/PEX)   |
| 9. Plásticos reforzados con fibra (FRP) o plásticos reforzados con fibra de vidrio (GRP) |  |

### **Materiales para tubería**

Los materiales para tuberías se enlistan a continuación de acuerdo con criterios de selección.

- Fluido geotérmico no oxigenado y líquidos de  $\text{pH} > 5.5$ . Los materiales de tuberías para los diversos procesos donde las características de los fluidos de trabajo cumplan estas especificaciones son:
  1. A106 Grado B
  2. A 53 Grado B
  3. API 5L Grado B
  
- Condensado oxigenados o no oxigenados de  $5.5 > \text{pH} > 3.5$ . Las tuberías que conduzcan este tipo de fluidos deberán ser de acero inoxidable ASTM 312-316L o equivalente, plástico ABS, HDPE, PEX o FRP/GRP.

El tubo de plástico o FRP/GRP debe estar enterrado y la selección entre este y las tuberías debe basarse en consideraciones económicas y operacionales.

- Fluido geotérmico oxigenados. Para fluido oxigenados de sumideros, estanques y drenes sin presión deberán emplearse materiales tales como:
 

1. Acero al carbono	2. Aleaciones de aluminio
3. Plásticos ABS	4. PEX
5. FRP/GRP	6. cPVC



El tubo de plástico o FRP/GRP debe estar enterrado y la selección entre éste y las tuberías de aleación de aluminio debe basarse en consideraciones económicas y operacionales.

➤ Aire comprimido y fluidos a bajas temperaturas. La tubería para aire comprimido y otros fluidos a baja temperatura se seleccionará según corresponda entre:

1. Plástico ABS
2. Acero inoxidable ASTM A312-316L
3. Tubo de acero galvanizado
4. Tubería FRP/GRP
5. Acero bajo en carbono (no debe usarse para aire de instrumentos)

### **Materiales para recipientes a presión**

Las placas de acero que son empleadas para recipientes sometidos a presión, superior a la presión atmosférica, serán de acero A516 70.

Todas las partes que no se encuentren sometidas a presión deberán ser de aceros **ASTM A36 o ASTM A283-Grado C.**

#### **2.4.2 Selección de materiales para intercambiadores de calor**

Para la selección de materiales de los equipos de intercambio de calor se empleó el “método con ayuda de base de datos”.

La Secretaría de Salud establece en el Capítulo 5, titulado “Equipamiento, los materiales recomendados para la industria de los alimentos”, que los materiales no deben transmitir sustancias tóxicas, olores y sabores. Asimismo, deben ser estables inertes y no absorbentes, resistentes a la corrosión y resistentes a operaciones de limpieza periódicas.

En particular se recomienda el uso de aceros inoxidables para superficies que entran en contacto con alimentos o cuyos equipos se encuentran involucrados en los procesos industriales. Las superficies en contacto con el producto deberían tener una rugosidad de  $Ra \leq 0.8 \mu m$  y libre de imperfecciones como muescas, pliegues y grietas.

*Tabla 7 Lista de materiales que no se deben usar en contacto con los alimentos (primeras dos columnas de la izquierda) y los que más se usan (columna de la derecha)*

<b>Materiales que NO deben ser usados en contacto con los alimentos.</b>		<b>Materiales más usados en el diseño de equipos.</b>
Zinc	Plásticos que contengan fenol y formaldehido	Aceros inoxidables
Plomo	Madera	Aluminios y sus aleaciones
Cadmio	Cobre no alimentario	Cobre y sus aleaciones
Antimonio	Latón	Polímeros y Siliconas
Bronce	Acero galvanizado	Cerámicos

Los aceros inoxidables se clasifican en cuatro grupos principales y un quinto, el cual se conforma por aleaciones endurecidas por precipitación. Los aceros inoxidables son aleaciones de carbono y formadores de austenita como el níquel (Ni), manganeso (Mn), nitrógeno (N), cromo (Cr), por mencionar algunos.

Los tipos de acero inoxidables son los siguientes:

- Austeníticos (C-Ni,Mn,N). En esta clasificación se encuentran los aceros de serie 200 y 300 según la AISI. Presenta una excelente resistencia a la corrosión, así como también una muy buena soldabilidad. No son magnéticos y son ideales para temperaturas muy altas.
- Ferríticos (C:-Cr,Mo,Si,Al,Ti,Nb). Entre los aceros ferríticos se tienen los aceros serie 400 AISI. Son resistentes a la corrosión de forma moderada a buena aumentando la concentración de Cr. En cuanto a su soldabilidad es menor que los aceros austeníticos y para calibres delgados no son ideales. Son magnéticos y se limita su uso para procesos de formado en frío.
- Martensíticos (C-Cr). Entre los aceros martensíticos también se encuentran algunos de la serie 400. Son aleaciones de carbono y cromo; variando el contenido de cromo desde 10.5 al 18% y de carbono hasta el 1.2%. Esto los hace tener una mayor dureza y poca soldabilidad. Son magnéticos.
- Dúplex (C:-Cr,Ni,Mo). Los aceros dúplex tienen un alto contenido de cromo y níquel. Con aleaciones de N, Mo, Cu, Si y W, con las que adquieren una mejor resistencia

a la corrosión. Tienen una buena soldabilidad y su estructura mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

De acuerdo con las características generales de los aceros inoxidable se seleccionó el acero austenítico. Por otra parte, se consideró que debido a los fluidos de trabajo es sumamente importante evitar la corrosión en equipos y conexiones y los aceros inoxidable austeníticos presentan una mejor resistencia respecto a los ferríticos y martensíticos. Debido a las características propias del proyecto, emplear aceros dúplex o los súper dúplex representan costos más elevados, claro que esto va de la mano con su alta resistencia a la corrosión que estos aceros presentan, ya que superan en exceso la corrosión esperada por los fluidos de trabajo.

*Tabla 8 Características de los Aceros Inoxidable según su tipo*

Criterio	Aceros		
	Martensíticos	Ferríticos	Austeníticos
Resistencia a la corrosión	Baja	Buena	Excelente
Dureza	Alta	Media Baja	Alta
Magnético	Sí	Sí	No
Soldabilidad	Deficiente	Limitada	Excelente
Criterio	Malo	Regular	Excelente

Dentro de los aceros inoxidable austeníticos se tienen los aceros de las series 200 y 300 AISI. A continuación, se especifican sus características.

Serie 200 AISI	Menor cantidad de Ni y de 5 a 20% de Mn. Adicionando N se incrementa la resistencia mecánica.
Serie 300 AISI	Alto contenido de N y hasta 2% de Mn. Puede contener Mo, Cu, Si, Al, Ti y Nb.

De los aceros 300 se tienen: 301, 303, 304, 309, 310, 316 y 321, los cuales son los más usados. Los aceros 304 y 316 son los más empleados debido a las aplicaciones que tienen en la industria alimentaria, farmacéutica y/o procesos químicos, solo por mencionar algunos. La Secretaría de Salud recomienda el uso de aceros 304 y 316 y para aquellos equipos que llevan soldadura se recomiendan los tipos AISI 304L y 316L.

Los tipos 304 y 304L pueden soldarse utilizando la mayoría de las técnicas de soldadura de fusión o resistencia. Para el caso de secciones pesadas se emplea el 304L para reducir la ocurrencia de precipitación de carburos en la región afectada por el calor adyacente al grupo soldado.

El código ASME II Parte D, Materiales, tiene las especificaciones de aceros ASTM A240 ASTM A666, AMS 5513 para el 304 y ASTM A666, AMS 5511, los cuales según el código son empleados para los intercambiadores de calor.

*Tabla 9 Composición química y propiedades de los aceros 304 y 304L*

<b>Elemento</b>	<b>Tipo 304</b>	<b>Tipo 304L</b>
Carbono	0.07 máx.	0.03 máx.
Manganeso	2.00 máx.	2.00 máx.
Azufre	0.030 máx.	0.030 máx.
Fósforo	0.045 máx.	0.045 máx.
Silicio	0.75 máx.	0.75 máx.
Cromo	17.5 a 19.5	18.0 a 20.0
Níquel	8.0 a 10.5	8.0 a 12.0
Nitrógeno	0.10 máx.	0.10 máx.
<b>Propiedades físicas (Recocido) para 304 y 304L</b>		
Densidad [lb/in <sup>2</sup> ]	0.29	
Módulo de Young (10 <sup>6</sup> [psi])	28.0	
Dureza 304 (1/4)	Resistencia a la tracción 125 [ksi], Dureza HRC 25 a 32	
Dureza 304L (1/4)	Resistencia a la tracción 125 [ksi], Dureza HRC 25 a 32	

Para el caso de los aceros inoxidables 316 y 316L, el código ASME II Parte D Materiales especifica que los A240 y A666 son las especificaciones para materiales de equipos de intercambio de calor. En la Tabla 10 se muestran especificaciones de su composición química.

Las propiedades químicas de los aceros inoxidable tienen grandes efectos en las características de soldabilidad y corrosión. En la Tabla 11 se comparan dichos parámetros y se pueden tomar como base para seleccionar el tipo de acero inoxidable que mejor se adapte a las características de los intercambiadores de calor.

*Tabla 10 Composición química y propiedades de los aceros 316 y 316L*

<b>Elemento</b>	<b>Tipo 316</b>	<b>Tipo 316L</b>
Carbono	0.08 máx.	0.03 máx.
Manganeso	2.00 máx.	2.00 máx.
Azufre	0.030 máx.	0.030 máx.
Fósforo	0.045 máx.	0.045 máx.
Silicio	0.75 máx.	0.75 máx.
Cromo	16.0 a 18.0	16.0 a 18.0
Níquel	10.0 a 14.0	10.0 a 14.0
Molibdeno	2.0 a 3.0	2.0 a 3.0
Nitrógeno	0.10 máx.	0.10 máx.
<b>Propiedades físicas (Recocido) para 316 y 316L</b>		
Densidad [lb/in <sup>2</sup> ]	0.29	
Módulo de Young (10 <sup>6</sup> [psi])	28.0	
Dureza 316	Resistencia a la tracción 75 [ksi], Dureza HRB 95	
Dureza 316L	Resistencia a la tracción 70 [ksi], Dureza HRB 95	

*Tabla 11 Tabla comparativa de los aceros 304, 304L, 316 y 316L*

<b>Características</b>	<b>304 y 304L</b>	<b>316 y 316L</b>
Soldadura	Pueden soldarse empleando la mayoría de las técnicas de soldadura por fusión o resistencia. El material de relleno suele ser del tipo 308. En secciones pesadas se usa el 304L para reducir la precipitación de carburos.	Tienen menos capacidad de soldadura que los 304 y 304L. La cantidad de níquel mayor en estos aceros requiere una velocidad más lenta de soldadura por arco y más precaución para evitar el agrietamiento por calor. Los rellenos AWS E/ER

Corrosión	Proporcionan resistencia a la corrosión en oxidación y reducción moderadas en agua fresca y aplicaciones no marinas.	316L y 16-8-2 son los más empleados. Resisten más a la corrosión que los 304. Tiene mayor resistencia a las picaduras y buena resistencia a la mayoría de los químicos.
-----------	--	---

### **Materiales seleccionados.**

Después de realizar la selección de materiales para los equipos de intercambio de calor se tiene un resumen en la Tabla 12 que indica el material para los equipos del proyecto DGA 200, así como los materiales indicados en función del tipo de servicio, ver Tabla 13.

*Tabla 12 Materiales seleccionados para los intercambiadores de calor*

<b>Tipo de intercambiador de calor</b>	<b>Fluidos de trabajo</b>	<b>Material</b>	<b>Ventajas del material seleccionado</b>
Placas tipo chevron	salmuera-agua	316 – 316L AISI	Tiene una resistencia a la corrosión superior a otros aceros inoxidables serie 300.  Sus propiedades químicas y físicas lo hacen ser el material más adecuado para procesos de intercambio de calor en el sector alimentario.
Tubos aletados (tipo radiador)	agua-aire		Cumplen con el código ASME para materiales en equipos de intercambio de calor.

La velocidad de soldadura debe ser lenta: Los rellenos de soldadura pueden ser AWS E/ER 316L y 16-8-2

*Tabla 13 Materiales de tuberías según el servicio*

<b>Tuberías</b>	
<b>Servicio</b>	<b>Material</b>
Geotérmico	A106 B/A53 B
Agua de circulación	A106/A53

## **2.5 Memoria de cálculo térmico de equipos principales**

A continuación, se describe la metodología de cálculo de equipos principales, desde el punto de vista térmico. Los equipos considerados son un cambiador de calor (tipo radiador), un intercambiador de calor de placas y una bomba de agua de recirculación.

Para el caso de los intercambiadores de calor, se partió del requerimiento de calor del aire en el radiador, y posteriormente se calculó el requerimiento en el intercambiador de placas; mientras que, para el caso de las bombas se partió de las pérdidas de presión asociadas a los intercambiadores y la presión requerida para evitar evaporación (flasheo) en la succión, hasta llegar a la eficiencia eléctrica.

En todos los casos, se consideró que no hay pérdidas de calor ni presión a través de las líneas de tuberías que conectan a los diversos equipos.

### **2.5.1 Metodología general**

El dimensionamiento básico de un intercambiador de calor tiene por objetivo el área de transferencia de energía necesaria para cumplir con los requerimientos energéticos del proceso en cuestión. Puede hacerse de dos maneras, dependiendo de los datos iniciales con los que se cuente:

- a. Por Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (DMLT) si se cuenta con elementos suficientes para calcular todas las temperaturas de entrada y salida.

- b. Por Número de Unidades de Transferencia (NUT) en caso de que las temperaturas se desconozcan, ya que el método de DMLT se vuelve complicado al tener que recurrir a un proceso iterativo.

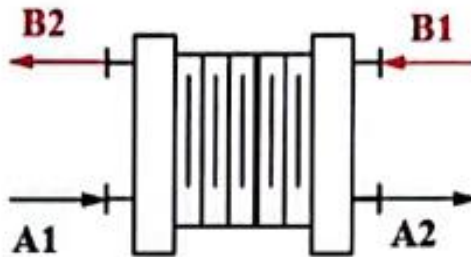


Fig. 18 Esquema del intercambiador de calor de placas

La ecuación básica del intercambiador de calor (balance de energía) con base en el esquema de la Fig. 18:

$$\dot{Q} = \dot{m}_A(h_{A1} - h_{A2}) = \dot{m}_B(h_{B2} - h_{B1}) \quad (1)$$

Suponiendo que podemos conocer las temperaturas de todas las corrientes:

$$DMLT = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (2)$$

Donde:  $\Delta T_A = T_{A1} - T_{B2}$ ;  $\Delta T_B = T_{A2} - T_{B1}$

De tal modo que se puede conocer el área de transferencia de calor,  $A$ , si se conoce el coeficiente global de transferencia de calor  $U$ .

$$\dot{Q} = UA * DMLT \quad (3)$$

### 2.5.2 Cambiador de calor

El intercambiador de tubos aletados es el elemento principal en la transferencia de energía desde el agua de circulación hacia el aire. Se busca tener una ganancia total



de energía de 500<sup>10</sup> kWt en el aire y que éste abandone el intercambiador a 66 °C, por lo que el diseño parte de estas premisas.

Cabe mencionar que la energía calculada se determinó con base en el calor isostérico reportado por Hossain, M.D. et al., citado en [68].

### Calor isostérico.

El calor isostérico es la energía disipada durante la adsorción (rehidratación) o la energía requerida para la desorción (secado/deshidratación) [69]. Técnicamente es una magnitud termodinámica que describe cuantitativamente la interacción entre el adsorbato (agua) y el adsorbente (piña). Su cálculo se hace generalmente de manera experimental, se cuantifican los calores isostéricos de adsorción, isotérmicos y adiabáticos, ya sea que el proceso transcurra a volumen constante, temperatura constante o que se realice sin intercambio de calor con el medio exterior [70]. La ecuación que define el calor isostérico se puede derivar de la ecuación del tipo *Clausius-Clapeyron*<sup>11</sup>, de la cual se encuentran diversos trabajos en la literatura [70-76, 68]. Los resultados experimentales para la piña se presentaron en la tesis de maestría del autor, citada en [77], donde se determinó la energía requerida para deshidratar piña, la cual, después de analizarse se determinó que el intercambiador de calor de tubos aletados debía tener una potencia térmica de 500 kW.

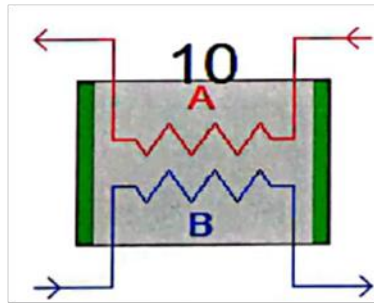
---

<sup>10</sup> Este valor fue determinado por la empresa contratista y tomado como referencia para el diseño del intercambiador de tubos aletados (agua-aire).

<sup>11</sup> La ecuación de *Clausius-Clapeyron* es fundamental en el estudio de las transiciones de fase de primer orden, en el diagrama PT está representada como la pendiente que describe la coexistencia de dos fases en equilibrio. En el trabajo de S. Velasco & C. Fernández [71] se presentan **once posibles formas de obtener su representación matemática**, algunos de ellos con diferentes variantes e indicando su grado de dificultad, así como los diferentes niveles de aplicación en las diversas áreas de la termodinámica.

P=1.08 Bara  
T=67 °C  
h=340.75 kJ/kg

P=1.10 Bara  
T=23 °C  
h=296.41 kJ/kg



P=3.87 Bara  
T=142 °C  
h=597.75 kJ/kg

P=3.87 Bara  
T=66.9 °C  
h=280.4 kJ/kg

Fig. 19 Esquema del cambiador de calor de tubos aletados (EA-02), tipo radiador

Según la ecuación (1) y considerando un 9% en pérdidas energéticas,

$$\dot{Q}_A = 500.0 \text{ kW} = \dot{m}_A(h_{A1} - h_{A2})$$

Dado que  $h_{A2}$  y  $h_{A1}$  están determinados, se calcula  $\dot{m}_A$

$$\dot{m}_A = \frac{500.0 \text{ kW}}{(340.75 - 296.41) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 11.3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Considerando una efectividad de intercambio de calor del 92% del EA-02, se calcula el calor total que debe ceder el agua de circulación (corriente B)

$$\dot{Q}_B = \frac{496.60 \text{ kW}}{0.92} = 539.8 \text{ kW}$$

Con esta cantidad y conociendo la temperatura de entrada de la corriente de agua de circulación, se calcula la temperatura de salida de esta corriente<sup>12</sup>.

$$539.8 \text{ kW} = \dot{m}_B (h_{B1} - h_{B2})$$

$$h_{B2} = 280.23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Lo cual indica una temperatura de:

<sup>12</sup> El flujo másico B, se indica en el diagrama del equipo EA-02.

$$T_{A2} = 66.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La DMLT

$$\Delta T_A = T_{A2} - T_{B1} = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_B = T_{A1} - T_{B2} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} = \frac{75 - 50}{\ln\left(\frac{75}{50}\right)} = 61.63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De tal modo el coeficiente  $UA$  resulta en:

$$UA = \frac{\dot{Q}_B}{DMLT} = \frac{539.8 \text{ kW}}{61.63 \text{ } ^\circ\text{C}} = 8.76 \frac{\text{kW}}{^\circ\text{C}}$$

En la Tabla 14 se presenta el resumen de los parámetros operativos del cambiador de calor y el diagrama TQ, ver Fig. 20.

### 2.5.3 Intercambiador de calor de placas tipo chevron

La cantidad de energía que el agua de recirculación obtiene del sistema de intercambio de calor (EA-01A, EA-01B y EA-01C) se considera igual a la que esta agua cede en el cambiador EA-02. En la Fig. 21 se muestran los datos conocidos de los flujos.

Tabla 14 Parámetros térmicos de operación del EA-02

Corriente	A	B	
	aire	agua	
Tipo de fluido			
Peso molecular	28.68	18.02	
Presión de entrada	1.10	3.87	bar
Temperatura de entrada	23	142	°C
Flujo de entrada	11.3	1.7	kg/s
Entalpía de entrada	296.41	597.75	kJ/kg
Presión de salida	1.08	3.20	bar
Temperatura de salida	67	66.92	°C
Entalpía de salida	340.75	280.31	Lj/kg
Caída de presión	0.02	0.682	bar
<b>Desempeño</b>			
Transferencia de calor		500.0	kWt
Pérdidas de calor		39.65	kWt
Coefficiente UA		8.76	kWt/°C
Pinch		50.0	°C
DMLT		61.63	°C

Intercambiador de IC-01-02

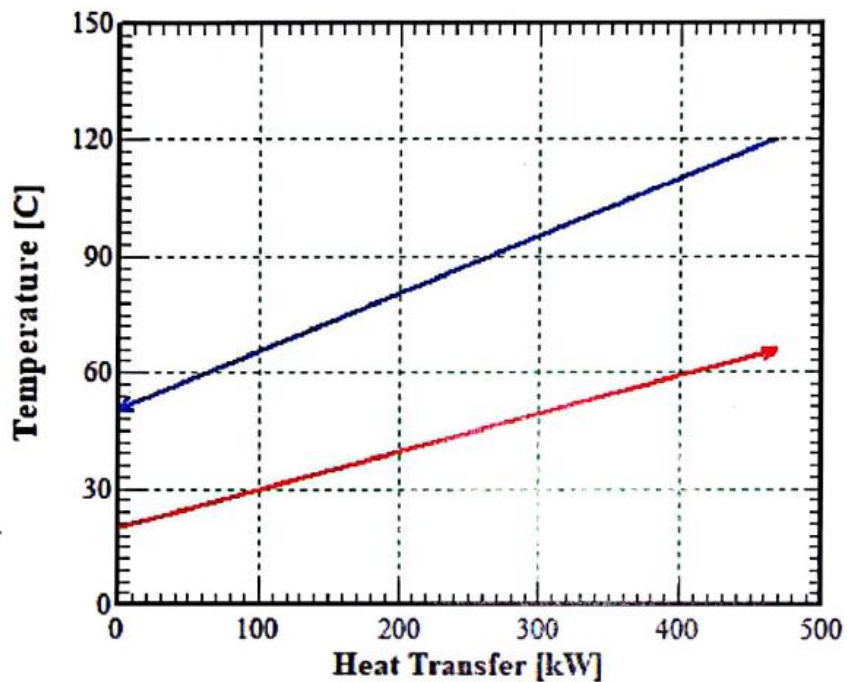


Fig. 20 Diagrama TQ del EA-02. En rojo la corriente de aire; en azul la corriente de agua de circulación

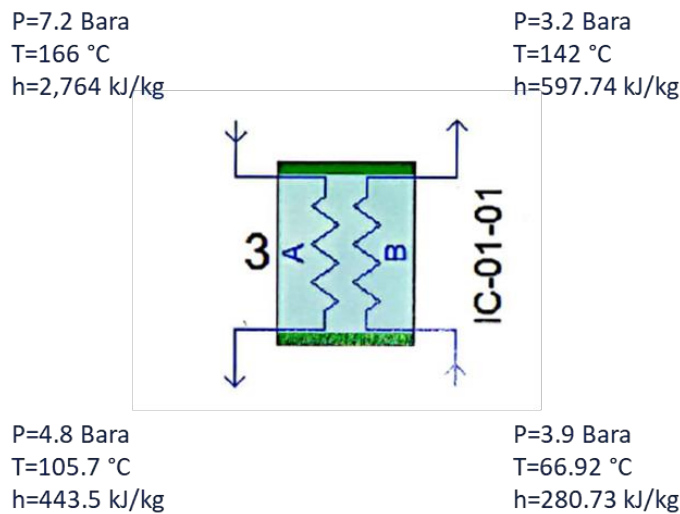


Fig. 21 Diagrama y datos de iniciales de flujo de IC-01-01, agua geotérmica en corriente A; agua de recirculación en corriente B

La energía recibida por el agua de recirculación se determinó en 539.65 kWt, por lo que se calculó la energía cedida por el agua geotérmica, considerando una efectividad del 92%.

$$\dot{Q}_A = \frac{539.65 \text{ kW}}{0.92} = 586.6 \text{ kWt}$$

Temperatura de salida del recurso geotérmico calculada:

$$T_{A2} = 105.70 \text{ °C}$$

La DMLT resulta en:

$$\Delta T_1 = T_{A1} - T_{B6} = 24.10 \text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = T_{A2} - T_{B3} = 38.70 \text{ °C}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = 30.82 \text{ °C}$$

De tal modo el coeficiente  $UA$  resulta en:

$$UA = \frac{\dot{Q}_B}{DMLT} = 19.02 \frac{\text{kW}}{\text{°C}}$$

En la Tabla 15 se presenta el resumen de los parámetros operativos del intercambiador de calor y el diagrama TQ, ver Fig. 22.

Tabla 15 Parámetros térmicos de operación de EA-01

Corriente	A	B	
	agua <sub>geo</sub>	agua <sub>rec</sub>	
Tipo de fluido			
Peso molecular	18.02	18.02	
Presión de entrada	7.2	3.9	bar
Temperatura de entrada	166	66.92	°C
Flujo de entrada	0.25	1.7	kg/s
Entalpía de entrada	2,764	280.73	kJ/kg
Presión de salida	4.8	3.2	bar
Temperatura de salida	105.7	142	°C
Entalpía de salida	443.5	597.74	kJ/kg
Caída de presión	0.24	0.68	bar
Desempeño			
Transferencia de calor		538.92	kWt
Pérdidas de calor		46.93	kWt
Coefficiente UA		19.02	kWt/°C
Pinch		46.82	°C
DMLT		30.82	°C

Intercambiador de IC-01-02

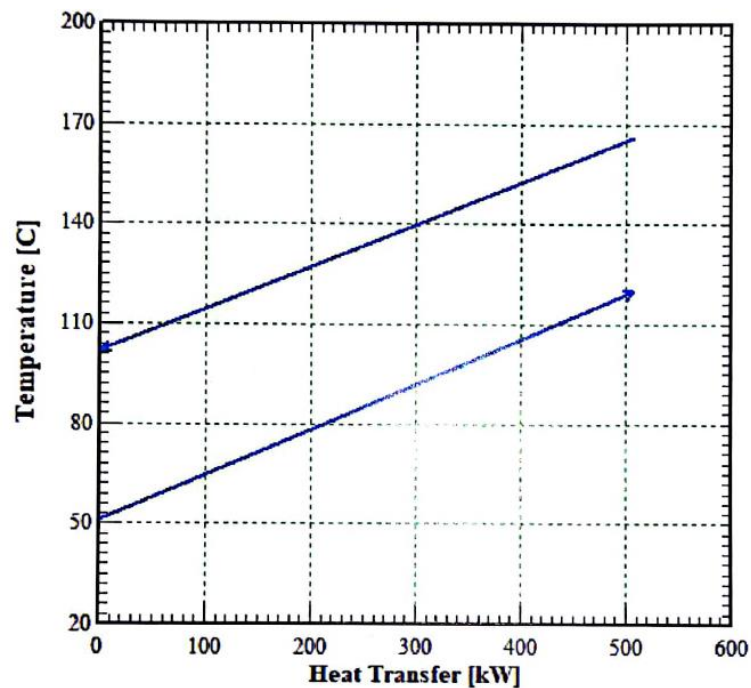


Fig. 22 Diagrama TQ de EA-01; superior, corriente de agua geotérmica; inferior, corriente de agua de circulación

### 2.5.4 Sistema de bombeo

Se propone el uso de bombas centrífugas para impulsar los flujos de agua geotérmica y de agua de recirculación. Las bombas deben cumplir requerimientos de incremento de presión en las líneas debido a caídas de presión  $\Delta P$  en los equipos intercambiadores de calor, de modo que deben proveer una potencia isentrópica igual a:

$$\dot{W}_s = \dot{m} \frac{1}{\rho} \Delta P$$

El requerimiento real de bombeo se ve afectado por la eficiencia isentrópica  $\eta_s$ :

$$\dot{W}_{bombeo} = \frac{\dot{W}_s}{\eta_s}$$

Considerando una eficiencia mecánica de flecha  $\eta_{mec}$ , la potencia mecánica requerida es:

$$\dot{W}_{mec} = \frac{\dot{W}_{bombeo}}{\eta_{mec}}$$

Finalmente, el requerimiento eléctrico de la bomba se obtiene mediante la eficiencia eléctrica  $\eta_{elec}$ :

$$\dot{W}_{elec} = \frac{\dot{W}_{mec}}{\eta_{elec}}$$

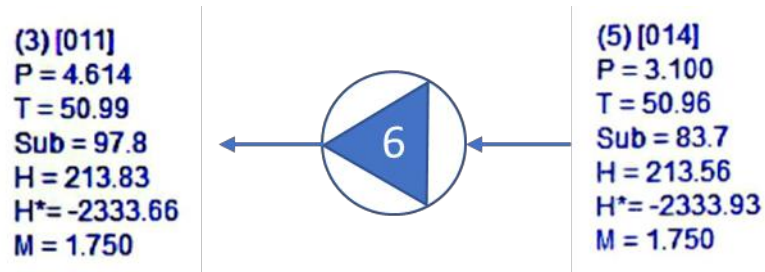


Fig. 23 Diagrama y datos de flujo de bomba de agua de recirculación

La caída de presión en los intercambiadores de calor para el agua de recirculación es igual a:

$$\Delta P = 151.40 \text{ kPa}$$

La potencia isentrópica de la bomba resulta en:

$$\dot{W}_s = \left(1.75 \frac{kg}{s}\right) \left(\frac{1}{987.70 \frac{kg}{m^3}}\right) (151.40 kPa) = 0.27 kW$$

Considerando una eficiencia isentrópica global de 55.74% la potencia de bombeo requerida es:

$$\dot{W}_{bombeo} = \frac{0.27 kW}{0.5572} = 0.4814 kW$$

Considerando una eficiencia mecánica de 92%, la potencia mecánica requerida es:

$$\dot{W}_{mec} = \frac{0.4814 kW}{0.92} = 0.5233 kW$$

*Tabla 16 Parámetros de operación de la bomba de agua de recirculación*

<b>Bomba BA-01-01</b>	potencia de bombeo	0.4814 kW
	Potencia de flecha	0.5233 kWe
	Eficiencia isentrópica de bombeo	84.55 %
	Eficiencia isentrópica global	55.72 %
	Pérdidas mecánicas	0.0419 kW
	Eficiencia mecánica	92 %
	Punto de diseño RPM	3600 ---
	Actual RPM	3600 ---
	Densidad de enetrada de diseño	987.7 kg/m <sup>3</sup>
	Entrada	
	Presión	4.614 bar
	Temperatura	50.99 °C
	Flujo másico	1.75 kg/s
	Entalpía	213.83 kJ/kg
	Salida	
	Presión	3.1 bar
	Temperatura	50.96 °C
Entalpía	213.56 kJ/kg	



**Water Pump[6] - BA-01-01 - Performance Map**  
1 existing units and 1 operating units

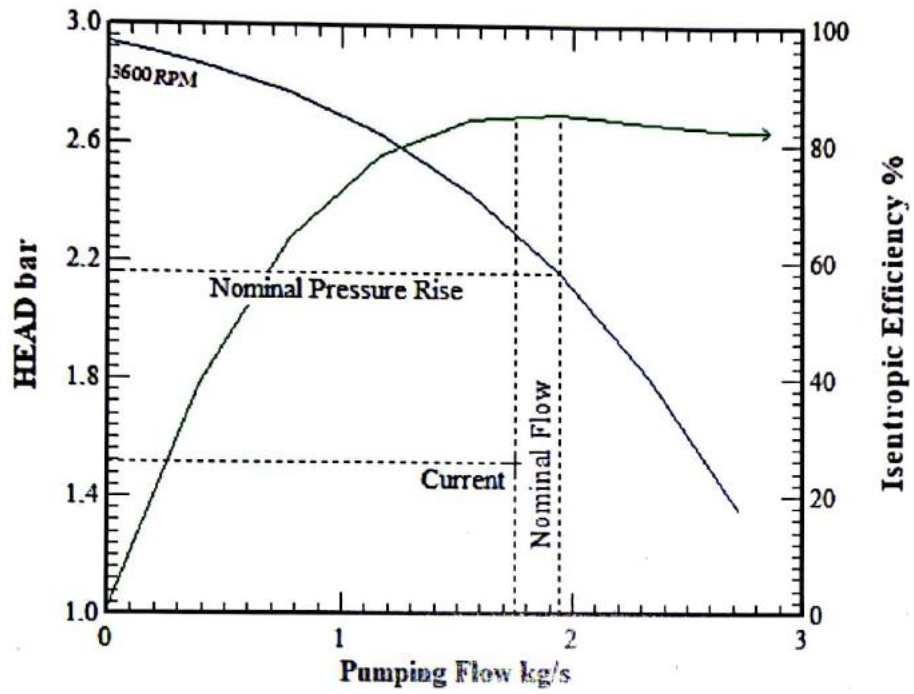


Fig. 24 Curva de desempeño preliminar BA-01-01



### 3 METODOLOGÍA, EVALUACIÓN DE LA PIÑA DESHIDRATADA

#### 3.1 Muestras

Las piñas que se deshidrataron en el DGA 200 son originarias del estado de Nayarit, donde se pueden encontrar las especies Cayena, Miel y Esmeralda. Se clasifican de acuerdo con el grado de madurez que se hizo con base en el documento *PC-029-2005* “Pliego de Condiciones para el Uso de la Marca Oficial México Calidad Suprema en Piña”, el cual establece los lineamientos de la marca oficial, *Calidad Suprema*, que es propiedad del Gobierno de México, y se otorga a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), ver Fig. 36 y Tabla 22 en el APÉNDICE.

Las piñas se compraron a finales del mes de noviembre de 2018 y se seleccionaron de acuerdo con las especificaciones en la norma *NMX-FF-028*<sup>13</sup>. El nivel de maduración con el que se compraron fue el No 2, dando así la oportunidad de madurarlas y homologar su nivel de maduración para el procesamiento en el deshidratador. Cabe mencionar que para la manufactura de la piña deshidratada se siguió la *NOM-251-SSA1-2009*<sup>14</sup>

Se eligió este fruto por su alto contenido de azúcar, vitamina C (ácido ascórbico o AA) y cantidad de humedad, características del fruto que demanda una gran cantidad de energía para su deshidratación [78], pero que lo hacen un alimento delicado por la fácil caramelización del azúcar y pérdida de AA.

#### 3.2 Deshidratación de piña

En la Tabla 23 en el APÉNDICE, se detallan los pasos que integran el proceso de preparación de la piña deshidratada, desde su selección hasta su envasado. Una vez obtenidos los lotes de producción de la piña deshidratada, se evaluó su calidad microbiológica, fisicoquímica y sensorial.

---

<sup>13</sup> Non-Industrialized Food Products for Human Consumption – Fresh Fruit – Pineapple (Ananas comosus var. Comomorus) – Specifications [115].

<sup>14</sup> Norma Oficial Mexicana, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios [116].

Tabla 17 Información de los siete lotes procesados en el DGA 200

Piña	Lote	Cantidad kg secos	Tiempo cámara h.	Temp. °C
Miel	08122018	14.300	15	78.4
Esmeralda	11122018	20.078	20	67.1
Cayena 1	15122018	31.528	18	71.4
Cayena 2	19122018	36.078	18	72.0
Cayena 3	09122018	10.482	16	64.2
Cayena 4	12122018	21.542	18	70.0
Cayena 5	21122018	80.248	17	80.0



Fig. 25 Diferentes lotes de piña deshidratada

### 3.3 Análisis microbiológico

Para la preparación, dilución de muestras se siguió la Norma Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994. Para la determinación de mesófilos aerobios se utilizó la Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994; coliformes totales y fecales se determinaron siguiendo la Norma Oficial Mexicana 112-SSA1-1994; hongos y levaduras según la

NOM-111-SSA1-1994. Por otra parte, se determinaron *Salmonella* spp y *Staphylococcus aureus* enterotoxigénico mediante pruebas rápidas Compact Dry®.

### **3.4 Análisis fisicoquímicos**

Como un control de deshidratado las dos características fisicoquímicas que se midieron fueron Actividad de Agua (aw por sus siglas en ingles), el cual se determinó con un medidor de water activity Hand Held MS21000, y Total soluble solids TSS (°Brix), los cuales se determinaron con un refractómetro.

Con la finalidad de conocer las características de las tres variedades de piña, se evaluaron muestras de piña Miel, Esmeralda y Cayena 2; cabe mencionar que todas las muestras de Cayena 1 a la 5, pertenecen a un lote general, pero se deshidrataron en días y bajo condiciones diferentes, presentando características similares, sin embargo, se seleccionó Cayena 2 porque se deshidrató a una temperatura intermedia al del resto de las cayenas y por su similitud sensorial con la piña Esmeralda; mientras que la piña Miel se seleccionó como caso de interés al ser una muestra totalmente diferente a las otras, así como por su alta temperatura de deshidratación.

Para tener como referencia las principales características de la piña deshidratada, se determinó el contenido de AA a través del método AOAC 1990 697.21, proteína cruda, utilizando el método AOAC 2015 2001.11, carbohidratos, utilizando el método azúcares reductores DNS y método fenol sulfúrico azúcares totales, acidez, método AOAC 2015 940.15 y método AOAC 985.54, y fibra dietaria.

### **3.5 Evaluación sensorial, Perfil Flash (PF) modificado**

El PF modificado se realiza con un grupo de jueces entrenados en metodología descriptiva, ya que se obtiene un mejor consenso de respuesta, en virtud de que permite generar una lista conjunta de atributos para la piña deshidratada [79]; se integró un panel de evaluación por 13 panelistas (21 - 47 años, 8 mujeres y 5 hombres, estudiantes de la Facultad de Química, UNAM), quienes ya contaban con un año de experiencia como jueces entrenados en análisis descriptivo convencional para evaluar alimentos deshidratados. Las evaluaciones se realizaron en el Laboratorio de Evaluación Sensorial del anexo del Laboratorio 4D, edificio A, en la Facultad de Química de la UNAM<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> El laboratorio está certificado bajo la norma ISO, 2007

En la primera sesión, se les presentaron a los jueces cuatro muestras de piña deshidratada (esmeralda, miel y dos muestras de cayena) y se les pidió a los jueces que generaran los atributos sensoriales de aspecto, olor, sabor, textura y resabio para cada una de las muestras. En la segunda sesión, se elaboró una lista consenso de atributos (eliminando sinónimos, terminología ambigua o afectiva) y se definieron las escalas en que se evaluaría cada atributo. Y finalmente se procedió a la evaluación de los siete lotes de piña deshidratada, objeto de este estudio. Para la evaluación de las muestras se colocó una rebanada de piña deshidratada; todas las muestras se identificaron con códigos de tres dígitos y evaluaron a temperatura ambiente. También se les proporcionaba a los jueces un vaso de agua y unas galletas habaneras para que se enjuagaran el paladar entre cada muestra (Fig. 37 en el APÉNDICE). Las sesiones de evaluación sensorial y los cuestionarios se diseñaron utilizando el software *FIZZ* (*Biosystems*, versión 2.51c, módulos de Adquisición y Juez, *Courtenon*, Francia). La escala para medir la intensidad de los atributos fue una escala de 9 puntos, donde 1 representa la mínima intensidad del estímulo y 9 la máxima.

### **3.6 Análisis instrumental: color y textura**

Para el análisis de color se midieron los parámetros de color a temperatura ambiente, utilizando el sistema CIE,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , con espectrofotómetro *Minolta CM-3600d*. Las piñas deshidratadas se envolvieron en papel *kleen pack*, y se ajustó el equipo con un área de visión pequeña, iluminante D65 y se evaluaron 6 réplicas por muestra.

El componente especular excluido (SCE), se seleccionó porque permite correlacionar la medida hecha por el ojo humano y el instrumento, por lo que este, al evaluar el color toma en cuenta el brillo y la textura (apariencia) de la muestra, lo que permite mayor discriminación por parte del equipo. El detector que funge como observador, está situado en todos los análisis en  $10^\circ$  [80].

Por otro lado, en el análisis de textura se empleó el análisis de punción que se encarga de medir la fuerza requerida para introducir una sonda dentro de un alimento y medir su dureza o firmeza [81, 82]. Se utilizó una sonda cónica de 2 mm de diámetro (P/2N), con el equipo *TA.XT2i*, *Texture Analyzer Stable Micro Systems*, software *Texture Expert EXCED®* a una fuerza de 0.7 N y una velocidad de 2 mm/s, a temperatura ambiente, se evaluaron 6 repeticiones por muestra.

### 3.7 Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software *XLSTAT* para Microsoft Excel® (*XLSTAT* versión 2020.2.2, *Addinsoft*).

Los datos provenientes de aw y °Brix se analizaron con ANOVA (Análisis de Varianza) a una vía a un  $\alpha = 0.05$  y DMS (Diferencia Mínima Significativa) que permitieron determinar si existía diferencia estadísticamente significativa entre las muestras.

El análisis estadístico de los datos del Perfil Flash se realizó con el método multivariado Análisis Procrustes Generalizado (GPA). El GPA se considera un análisis exploratorio de datos multivariados y proporciona una interpretación gráfica de las distancias entre muestras, lo que se denomina espacio sensorial de atributos. Este análisis bidimensional usa traslación, rotación y escalamiento para obtener la posición media de los productos, Terhaag and Benassi (2010), citado en [83].

Para evaluar el consenso del panel y visualizar el posicionamiento sensorial relativo de atributos y productos se emplea el Análisis de Componentes Principales (PCA) [79].

Para procesar simultáneamente los resultados de los diferentes análisis (textura, color sensorial), se realizó el Análisis de Factor Múltiple, que permite el análisis simultáneo de diversas tablas de variables, y obtener resultados, especialmente gráficos, que permitan estudiar la relación entre observaciones, variables y tablas. Dentro de una tabla, las variables deben ser del mismo tipo (cuantitativas o cualitativas), pero las tablas pueden ser de diferentes tipos (*XLSTAT*, 2021) para evaluar simultáneamente varios atributos sensoriales de aspecto y textura con los datos obtenidos de la evaluación instrumental de color y textura.





## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Deshidratación de piña

Se deshidrató piña (Fig. 26) con energía geotérmica procedente de la plataforma de separación PS-02 de la Geotermoeléctrica DSP. El DGA 200 representa una capacidad instalada de 0.53 MWt, utiliza 3,676 GWh/año, equivalente a dejar de emitir 338.55 t CO<sub>2</sub>/GWh, o lo que es igual a 1.25 Mt CO<sub>2</sub>/año.



Fig. 26 Piña deshidratada, de izquierda a derecha Miel, Cayena 2 y Esmeralda

### 4.2 Microbiológico

El primer análisis realizado a los lotes fue el microbiológico, ver Tabla 18, Se puede observar que los valores para *mesófilos aerobios*, *coliformes totales*, *hongos* y *levaduras* y *salmonella spp*, están dentro de las especificaciones propuestas, es decir las condiciones de deshidratación empleadas en los siete lotes, permitieron obtener muestras con buena calidad microbiológica.

El crecimiento microbiológico desde el punto de vista del contenido de aw, no presentó ningún problema, ya que para las siete muestras se obtuvieron resultados por debajo de 0.6 (ver Tabla 19), el cual, es considerado por la secretaria de Salud de México (SSA), la FDA de EUA y la Comunidad Económica Europea como un punto crítico para determinar si un alimento es estable o no lo es. Otro aspecto importante por mencionar son las temperaturas del proceso, que como se podrá observa son mayores al límite de crecimiento microbiológico mencionado en la sección 1.2.

*Tabla 18 Evaluación microbiológica*

<b>Especificaciones</b>	<b>Resultado</b>	<b>Límite máximo</b>
Cuenta bacteriana total o mesófilos aerobios		500 ufc/g
Miel	200	
Esmeralda	230	
Cayena 01	80	
Cayena 02	80	
Cayena 03	90	
Cayena 04	75	
Cayena 05	60	
Coliformes totales		25 ufc/g
Miel	<0.3 s.m.	
Esmeralda	<0.3 s.m.	
Cayena 01	<0.3 s.m.	
Cayena 02	<0.3 s.m.	
Cayena 03	<0.3 s.m.	
Cayena 04	<0.3 s.m.	
Cayena 05	<0.3 s.m.	
Hongos y levaduras		300 ufc/g
Miel	40 v.e.	
Esmeralda	100	
Cayena 01	50 v.e.	
Cayena 02	50 v.e.	
Cayena 03	120 v.e.	
Cayena 04	50 v.e.	
Cayena 05	30 v.e.	
Salmonella spp		Ausente en 25 g
Miel	Ausencia	
Esmeralda	Ausencia	
Cayena 01	Ausencia	
Cayena 02	Ausencia	
Cayena 03	Ausencia	
Cayena 04	Ausencia	
Cayena 05	Ausencia	

v.e.: valor estimado; s.m.: sensibilidad del método

### 4.3 Fisicoquímico

En la Tabla 19, se muestran los resultados del aw y °Brix de los 7 lotes de piña deshidratada, en la que se aprecia que las muestras con menor aw fueron Cayena 4, 5 y Miel, que fueron las muestras que se deshidrataron a mayor temperatura (70.0, 80.0 y 78.4 °C, respectivamente). Las diferencias entre cada una de las muestras tienen que ver con la temperatura de deshidratación y la variedad de la piña, ya que se reporta que la piña cayena tiene 85.61% [84] de humedad mientras que la miel tiene 85%. Otro parámetro evaluado fue los °Brix, observándose que las muestras con menor °Brix fue la Cayena 5 y la de mayor °Brix fue Cayena 3.

Como se puede apreciar, entre mayor es la relación que guarda el contenido de °Brix y la cantidad de agua disponible en el alimento (aw), coinciden con lo reportado por López-Cerino et al. (2017), citado en [85], que dice que a mayor cantidad de azúcares disueltos mayor energía térmica necesaria para su deshidratación, por lo que si las condiciones de proceso fueron similares (temperatura y tiempo) para las siete muestras, era de esperarse que aquellas muestras con alto índice de °Brix tuvieran mayor aw.

*Tabla 19 Determinación de humedad (%) en los lotes de piña deshidratada*

Muestra	°Brix	aw
Miel	11.100 <sup>ab</sup>	0.494 <sup>a</sup>
Esmeralda	12.650 <sup>a</sup>	0.546 <sup>a</sup>
Cayena 1	12.367 <sup>ab</sup>	0.454 <sup>b</sup>
Cayena 2	11.033 <sup>ab</sup>	0.501 <sup>a</sup>
Cayena 3	12.833 <sup>a</sup>	0.531 <sup>a</sup>
Cayena 4	11.667 <sup>ab</sup>	0.418 <sup>a</sup>
Cayena 5	10.700 <sup>b</sup>	0.482 <sup>a</sup>

En la Tabla 20 se presentan los resultados fisicoquímicos de las tres muestras seleccionadas, de las cuales también se hizo un estudio de vida de anaquel, pero los resultados se reservan para ser presentados en otra publicación.

*Tabla 20 Resultados fisicoquímicos de las tres muestras de piña seleccionados*

	<b>Vitamina C</b> mg/100 g	<b>Proteína</b> cruda (%)	<b>Carbohidratos</b> g azúcar reductores/100 g	<b>Carbohidratos</b> g azúcar/100 g	<b>Fibra</b> dietaria (%)
Miel	199.4c	3.50b	0.93c	70.79a	7.18b
Esmeralda	52.47b	3.19a	0.77a	76.97b	7.61a
Cayena 2	32.20a	3.41b	0.85b	69.94a	10.98c

La piña como fuente importante de compuestos bioactivos que incluyen antioxidantes como AA, flavonoides, compuestos fenólicos y pectinas, la caracterizan como un alimento importante para la nutrición [86-88]; y de dichos compuestos bioactivos el que tiene mayor interés es el AA al ser uno de los compuestos volátiles que se degrada por diversas variables como el pH, la presencia de enzimas, oxígeno, catalizadores metálicos, luz y temperatura [89], siendo este último un aspecto relevante para los procesos de deshidratación con aire caliente.

De las muestras evaluadas, Miel presentó un contenido alto de AA a pesar de haber sido deshidratada a una mayor temperatura, comparado con las variedades Esmeralda y Cayena, quienes presentaron un contenido menor a los 55 mg/100g, y era de esperarse porque el tiempo de exposición al calor fue de 15 horas, mientras que para Esmeralda y Cayena 2 la exposición a alta temperatura fue de 20 y 18 horas, respectivamente; también fue mayor la cantidad de piña que se deshidrató 20 y 36 kg de pulpa, respectivamente. Resultados similares son reportados para piña deshidratada a 60 °C, rebanadas de 10 mm de espesor y 13 horas de deshidratación, con un contenido final de AA de 101 mg/100g [90]; y correlacionando dicho fenómeno en jitomate con rebanadas de 11 mm a una temperatura de 60 °C y tiempo de exposición entre 16 y 20 horas, se registró una pérdida de AA entre el 30 y 40% [91], lo anterior también coincide con lo reportado por 40 estudios de diversos alimentos<sup>16</sup> deshidratados, donde el 43% perdieron entre el 21.8 y 53% de AA bajo condiciones similares de deshidratación (60 °C) [92]. Cabe mencionar que, si bien la piña no está

<sup>16</sup> Los alimentos estudiados por L. Červenka et al. (2018), citado en [92], se caracterizan por su contenido de AA, total de compuestos fenólicos, y contenido total de flavonoides.

dentro de los estudios anteriormente mencionados, se caracteriza como fuente importante de compuestos bioactivos que incluyen antioxidantes como AA, flavonoides, compuestos fenólicos y pectinas que son importantes para la nutrición [86-88].

Las tres muestras reportan cantidades de proteína similares, y coincide con lo reportado en piña deshidratada (2.5%) [93, 90]. Por otro lado, la piña cayena fue la que presentó mayor fibra dietaria. En cuanto a la cantidad de carbohidratos que presentan las muestras de piña deshidratada están dentro de un rango de 69 a 77 gramos por cada 100 gramos de muestra; los cuales coinciden con los reportados en piña deshidratada (productos comerciales) con valores de 65.7 g/100g [90].

#### 4.4 Análisis sensorial, PF modificado

Los atributos seleccionados para evaluar el perfil de la piña deshidratada se muestran en la Tabla 21.

*Tabla 21 Atributos definidos para evaluación de Perfil Flash*

Aspecto	Textura	Olor	Sabor	Resabio
capa blanca	adhesividad	acaramelado	ácido	amargo
color	crujiente	cítrico	astringente	
fibrosidad	dureza	dulce	caramelo	
homogeneidad	fracturable	intensidad	dulce	
puntas marrón	rugosa	piña	intensidad	
tostado		fermentado tostado	piña	

En la Fig. 27, se muestran los resultados del GPA para sabor y olor de los 7 lotes de piña deshidratada, el PCA de los resultados explica el 80.23% de la variabilidad de las muestras. El componente F1 explica el 67.82% de la variabilidad de los datos, mientras que el componente F2 explica el 12.41% de la variabilidad; correlacionados positivamente al factor 1 y al factor 2 está la piña fresca, la cual se asocia con sabor: fermentado, salado, fresco, piña, dulce y astringente; olor: cítrico, fermentado, dulce, frutal, fresco y piña, y resabio: astringente y escaldado. Las muestras de cayena 5, 4 y 3 se correlacionaron con la intensidad de sabor y olor, sabor: ácidos y caramelizados y olor: tostado. Por otro lado, las muestras de Cayena 2, 1, Miel y Esmeralda se

relacionaron negativamente al factor 1 y positivamente al factor 2, y se caracterizaron por su olor caramelo y su resabio amargo.

Para los lotes que presentaron olor caramelizado y resabio amargo, coincide con altas temperaturas de deshidratación (más de 70 °C), y fueron el grupo con mayor contenido de azúcar. Lo anterior obedece a las modificaciones en los aromas y sabores asociados a la reacción de caramelización. En los alimentos deshidratados se buscan notas de sabor frescas, verdes y sabores dulces [94], que normalmente se pierden en el deshidratado debido a las temperaturas de trabajo, y por la sensibilidad de los compuestos como carotenoides y ácidos grasos. En consecuencia, el color característico de la piña se torna a una coloración que oscila entre los tonos marrones/tostados y a esto también se le atribuye la producción de HMF [95].

Respecto al contenido de azúcar en la piña, es esta característica la que le atribuye al fruto la cualidad de requerir una gran cantidad de energía de activación para poder deshidratarla y es esta característica la que hizo que en este estudio se seleccionara la piña como un producto para el estudio de deshidratación.

Al llevar a cabo el perfil con un grupo de jueces entrenados, se espera que el consenso de los jueces sea bueno [79], y esto se observó en la evaluación de la piña (Fig. 28) coincidiendo con lo reportado en otros estudios donde se utilizó el PFM.

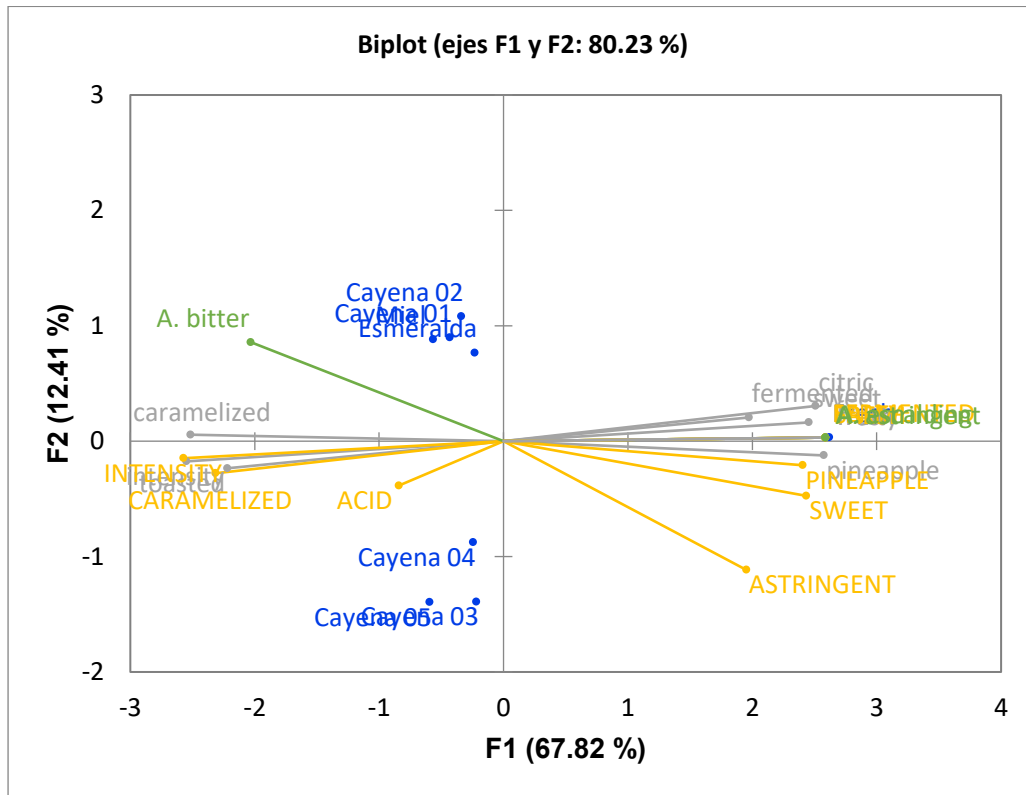


Fig. 27 PCA de la comparación de olor y sabor para piña fresca y deshidratada

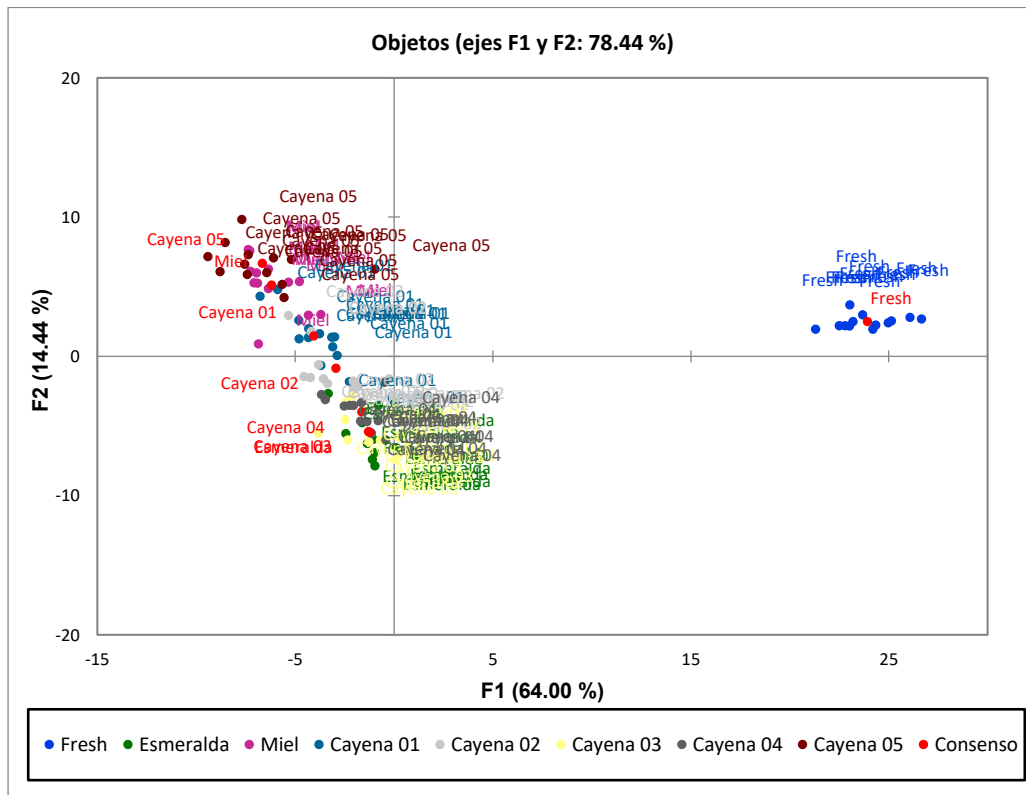


Fig. 28 Resultado del consenso de las siete muestras de piña

#### **4.5 Análisis Factorial Múltiple, Correlación entre características sensoriales y color y textura instrumental**

Para conocer la correlación entre los atributos sensoriales de aspecto y textura, así como el color y textura medidos instrumentalmente, se hizo un Análisis Factorial Múltiple (MFA), Fig. 29 y Fig. 30. Se consideraron cuatro grupos de variables, de los cuales dos de ellos corresponden a los parámetros instrumental (textura y color) y los otros están relacionados con las variables sensoriales de apariencia y textura.

Entre los dos factores del MFA, factor 1 y factor 2, explican el 60.55% y 17.25% del total de la variedad en los resultados. En general las muestras frescas son diferentes de las muestras deshidratadas.

Correlacionados positivamente a ambos componentes se encontró la piña fresca que se correlacionó con los atributos sensoriales de aspecto: fibroso y color amarillo, y textura: cohesión, fibrosa, rugosa, astringente, jugosa, dureza and masticabilidad; y con dureza y fractura medidos instrumentalmente. Era esperado que la jugosidad estuviera correlacionada con la piña fresca ya que esta fruta presenta en promedio un 85% de humedad [90], y por esto se considera una fruta jugosa. Por otro lado, debido a que está constituida por la fusión de 100 a 200 flores individuales, integrando un eje carnosos o corazón, le otorga características que podrían influir en la fracturabilidad percibida; y dicho sea de paso, dicho centro se caracteriza por ser astringente [87].

La piña fresca fue dura y esto se percibió tanto sensorial como instrumentalmente, lo que concuerda con los estudios en piña fresca hechos por Montero-Calderon (2010), citado en [87], es probable que este atributo se haya correlacionado con la piña fresca porque la rebanada fresca fue de 5 mm y al deshidratarse quedó de 2 mm, esto pudo influir en la percepción de la dureza por dos factores; el primero está relacionado con su alto porcentaje de encogimiento, ya que hay estudios que demuestran que a altas temperaturas, el encogimiento disminuye y viceversa [96-98], mientras que el segundo factor es la porosidad en el alimento, que también tiene que ver con su encogimiento, mayor formación de poros menor es su reducción en volumen o cambio de dimensiones, debido a la remoción del agua contenida en la piña [99].

Por otro lado, las muestras deshidratadas se correlacionaron negativamente al componente 1 lo que indica que su perfil sensorial es diferente al de las muestras frescas. Cayena 5, 1 y Miel, pero solo Cayena 1 y Miel se correlacionaron positivamente



al componente 2 y a los atributos sensoriales de aspecto: tostado y puntas marrones, textura: crujiente, fracturabilidad y rugoso, así como al componente a\* de la escala CIE Lab. Serdar & Ayse-Vildan (2016), citado en [96], establecieron que, si el tiempo de deshidratado es largo, los valores de L\* y b\* disminuyen, lo que se refleja directamente en coloraciones oscuras debido a la pérdida de luminosidad y del color amarillo, por colores marrón como los reportados en este trabajo.

Las muestras de Cayena 5 y 1 fueron deshidratadas a 80 y 71.4 °C, respectivamente, lo que provocó que las muestras se percibieran tostadas y con puntas marrones esta última característica no deseada en el producto deshidratado, por lo que se puede concluir que las muestras de piña de estas dos variedades se deben deshidratar a temperaturas menores a 70°C (entre 55 y 65 °C) para evitar este defecto. La pérdida de pigmentación está relacionada con el daño por oxidación al tejido, la cual se manifiesta más fácilmente en alimentos con alto contenido de azúcar, siendo la muestra de Cayena 1 la que presentó 13.6 °Brix, y Cayena 5, 10.7 °Brix, que, si bien fue uno de los valores más pequeños de los siete lotes, sí fue el que se sometió a la mayor temperatura de todos. Horuz and Maskan (2013), citado en [98], demostraron que la exposición prolongada del alimento a altas temperaturas incrementa la oxidación de pigmentos y el oscurecimiento enzimático y no enzimático.

La textura crujiente es esperada en una fruta deshidratada [94], así como una fracturabilidad media (7.9 N) para evitar que las muestras se rompan durante el empaquetado y posterior almacenamiento, en este estudio sólo las muestras deshidratadas a más de 75 °C presentaron alta fracturabilidad (mayor a 9.5 N) lo que provocó que algunas muestras se rompieran, pero aquellas deshidratadas por debajo de 75 °C, presentaron una menor fracturabilidad (6.7 N), lo que permitió mantener la rodaja intacta durante el almacenamiento. La mecánica estructural, indica que a grandes potenciales de esfuerzos generados en la estructura celular del alimento es lo que determinará el grado de encogimiento y, a su vez, éste determinará la capacidad de rehidratación de este. El potencial de esfuerzos depende de dos factores, el primero son las altas temperaturas, mientras que el segundo, son los extensos tiempos de deshidratación bajo los que se somete el alimento. Se han determinado para diferentes alimentos que las porosidades después de un proceso de deshidratación a altas temperaturas y prolongados tiempos de exposición se generan más poros en la estructura, lo que se relaciona con una alta fracturabilidad en los productos

deshidratados [97, 96]. Como se mencionó anteriormente, el encogimiento y la porosidad están íntimamente relacionadas con otra cualidad que se busca en los alimentos deshidratados, la cual se refiere a la rehidratación. La rehidratación es una importante propiedad que permite entender la calidad del proceso de deshidratación. Serdar & Ayse-Vildan (2016), citado en [96], determinaron que la capacidad de rehidratación se ve afectada si la velocidad y temperatura del aire disminuye, esto se debe principalmente a los cambios en la estructura; si la superficie del alimento carece de poros, quiere decir que la estructura colapsó y se verá reflejado en su encogimiento, por lo tanto, la penetración del agua al tejido en un proceso de rehidratación se verá afectada, por las escasas cavidades y poros presentes en el tejido.

Las muestras Cayena 2, 3, 4 y Esmeralda correlacionadas negativamente al componente 1 y 2, presentaron un aspecto: homogéneo y una textura: viscosa medida sensorialmente y correlacionada con los componentes  $b^*$ ,  $h^*$  y  $C^*$ ,  $L^*$  de la escala CIE Lab. Estas muestras presentaron una tonalidad de color amarillo con un valor promedio de  $h^*$  de 70.92, 83.81 y 48.11, respectivamente; aunque presentaron una textura sensorial adhesiva esta fue baja y no representó un problema para la muestra, que al tener una mayor  $a_w$  (mayor a 0.5) que las muestras de Cayena 5, y Miel (del orden de 0.48), son menos fracturables que las muestras Cayena 5, 1 y Miel, presentando una textura que mantiene su forma al empaquetarla. Su homogeneidad es un aspecto deseado por los consumidores quienes consideran que este atributo junto con el color de los alimentos los hace más apetecibles [94]. Cabe mencionar que la coloración amarilla en las muestras Cayena 2, 3, 4 y Esmeralda, indica una baja oxidación en la pigmentación, como ya se mencionó, y que coincide con el sabor astringente ácido proveniente del ácido ascórbico, el cual se ha demostrado que en tanto no prevalezcan las reacciones de caramelización este compuesto se mantendrá [100, 96, 98, 95].

Por otro lado, las muestras Cayena 1, 5 y Miel se correlacionaron negativamente al componente 1 y positivamente al componente 2, presentando características color: marrón oscuro, tostado y puntas café, y una textura: crujiente, fracturable y rugosa. El color de estas muestras fue marrón oscuro y eso explica su correlación con el componente  $a^*$  que indica que las muestras fueron sometidas a mayor temperatura, Miel y Cayena 5, o un mayor contenido de azúcares lo que provocó una mayor caramelización, en este caso la muestra de Cayena 3 fue la que presentó mayor contenido de azúcar, 12.833 °Brix.

Aunque no se hizo la prueba afectiva de piña deshidratada con consumidores, de otros estudios hechos con diferentes frutas deshidratadas como la guayaba, mango, papaya e incluso jitomate, se concluyó que los productos deshidratados con energía geotérmica, sensorialmente, conservan atributos de la materia fresca, entre los atributos característicos en general para las muestras sobre salieron notas dulces, adhesivo, textura flexible, olor y sabor característico de cada fruta, brillo y sabor ácido [94].

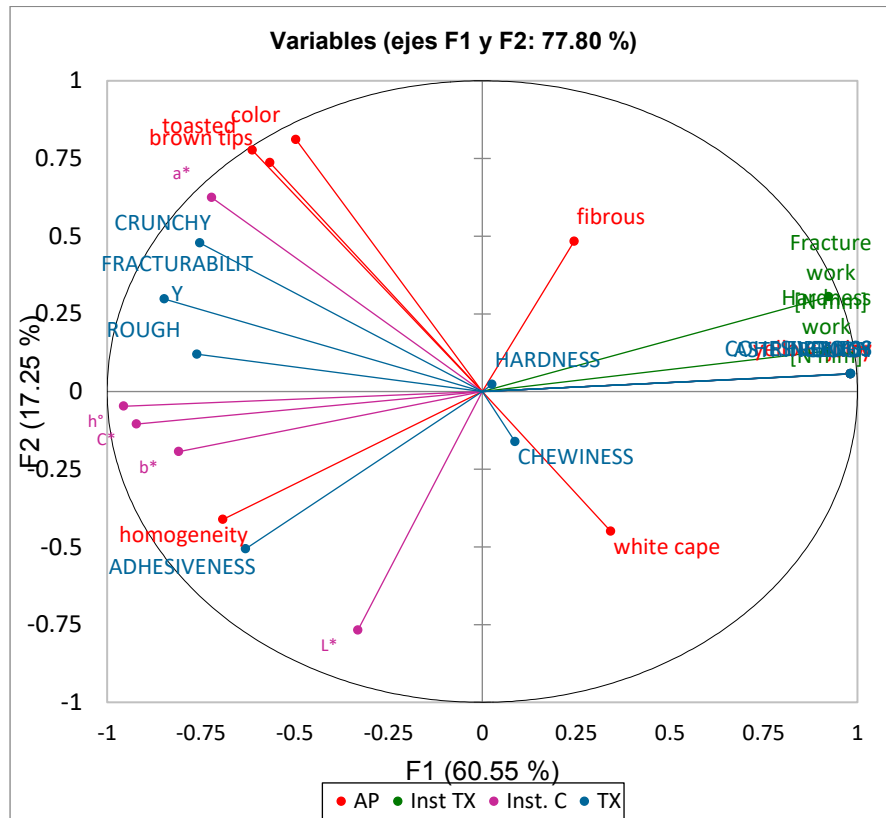


Fig. 29 Mapeo de PCA a partir del análisis de factores múltiples del instrumental y sensorial (aparición y textura) en piña deshidratada

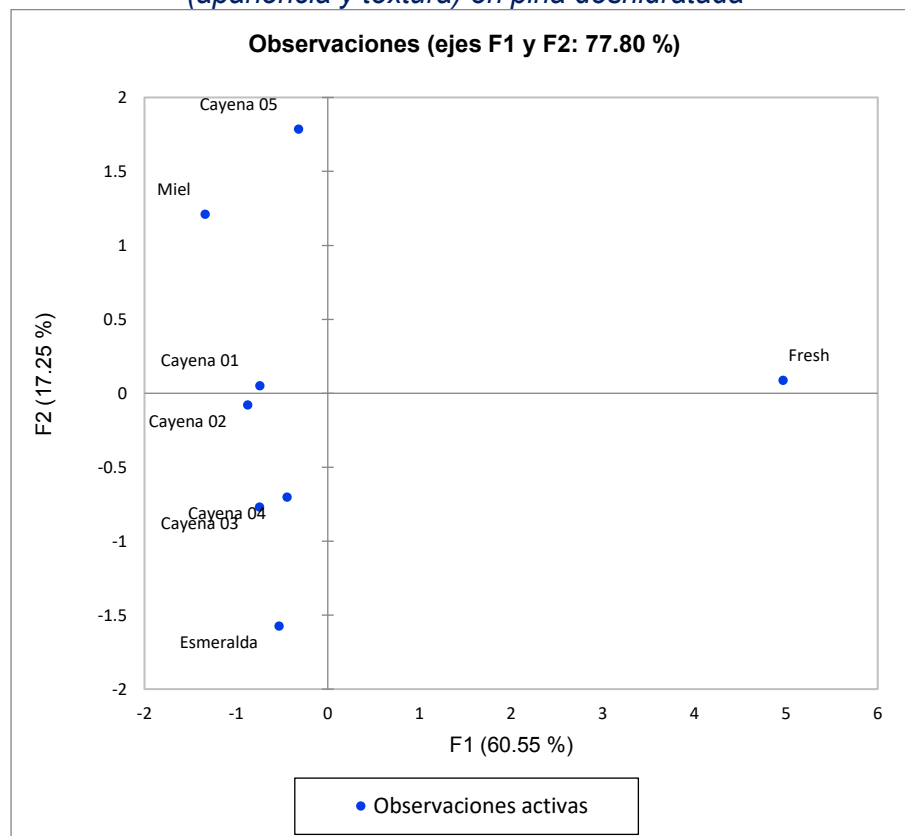


Fig. 30 Espacio sensorial de piña deshidratada, obtenido de Análisis de factores múltiples

## 5 CONCLUSIÓN

El deshidratador DGA 200 permite deshidratar piña con una calidad microbiológica que cumple con los parámetros establecidos en este trabajo. Pese a que se tienen las referencias microbiológicas de la cebolla y ajo deshidratado en México, no se comparan con la piña, en principio por ser alimentos diferentes, pero principalmente por sus compuestos bioactivos inherentes a sus componentes bactericidas naturales [101], por el contrario, el alto contenido de humedad, azúcar y fibra representan un medio altamente nutritivo que favorece el crecimiento microbiano [102], y por lo anterior se buscó tener más parámetros de referencia de alimentos similares a este, con los cuales se garantiza el funcionamiento del deshidratador y la inocuidad de sus productos.

El rango de temperatura en el que las muestras mantienen un color amarillo, es por la ausencia de caramelización, el cual está asociado a oxidación por altas temperaturas (superiores a 75 °C) y altos contenidos de azúcar (entre 12 y 13 °Brix), por lo que se deben considerar dichos aspectos en la deshidratación de la piña; por ejemplo, si las muestras tienen alto contenido de azúcar y se deshidratan a 70 °C habrá presencia de caramelización; por otro lado para muestras con bajo contenido de azúcar (10 °Brix) sometidas a 80 °C por mucho tiempo, presentarán el mismo fenómeno de caramelización.

La textura juega un papel importante desde el punto de vista en la percepción que tiene el consumidor, que sea agradable, pero al mismo tiempo define la vida de anaquel del producto, ya que si al momento de envasarse se fractura le quita presentación y agrado al producto, sin embargo, la presencia de este atributo es un indicador de la alta porosidad que tiene y en consecuencia su fácil capacidad de rehidratación que mantendrá, por lo que es importante definir el objetivo final de la piña deshidratada y con ello la calidad final que se le dará.

En conclusión. la deshidratación de la piña con el DGA 200 debe ser un proceso en el que se cuiden diversos aspectos como son la temperatura, humedad del aire y la velocidad de entrada. Paralelamente con estas variables se debe poner especial atención en la calidad de la materia prima como la especie de la piña y su nivel de maduración, ya que este último aspecto define tanto la firmeza de las rebanadas y la cantidad de sólidos disueltos (azúcar) cuantificados con el parámetro °Brix.

La capacidad instalada con el DGA 200 es de 0.531 MWt, la cual se estimó a partir del uso de 1.7 kg/s de flujo másico de agua caliente a 180 °C y un aprovechamiento de 74 °C (temperatura de salida del proceso 105 °C), así como un factor de planta de 0.8; con lo anterior, se estimó una cantidad de energía utilizada anualmente de poco más de 13 TJ [103], lo que equivale a consumir 136 millones de m<sup>3</sup> de gas L.P.; En el estado de Nayarit se cotiza el precio del combustible en 0.66 USD \$/litro<sup>17</sup>, resultando en un ahorro económico de USD\$ 360 millones por año.

Actualmente el desarrollo tecnológico DGA 200 está en su máxima madurez tecnológica, TRL 9, con la Planta Deshidratador Geotérmico de Alimentos DGA 600. Dicha planta se integra de tres módulos DGA 200, por lo que su escala de producción aumentó al triple y en consecuencia los parámetros de operación y producción tienden a cambiar, sin embargo, no fue necesario modificar las condiciones de operación, aspectos discutidos en este trabajo, ya que al ser sistemas modulares se garantizó que la producción sea en esencia la misma. El único tema donde se vio necesario hacer modificaciones fue en la cadena de producción, ya que al aumentar el volumen se requiere de mayor mano de obra y áreas para el almacenamiento tanto de la materia prima como de los productos (fruto deshidratado), pero esto no deja de ser un tema más de logística que de condiciones operativas. Lo que se buscó con el deshidratado de la piña por sus condiciones fisicoquímicas, fue generar condiciones de deshidratación críticas, condiciones de referencia para el hecho de que, si se puede deshidratar piña, cualquier otro fruto o verdura puede ser deshidratado, exceptuando aquellos que por su naturaleza poseen aceites vegetales como el caso del aguacate y coco, los cuales requieren de pre-tratamientos y usualmente se deshidratan con otros métodos.

Esta investigación y desarrollo tecnológico tiene relevancia por el uso de la energía renovable, es decir, pudo haberse hecho el mismo análisis para un sistema deshidratador convencional, sin embargo, el hecho de que pueda llevarse a cabo a través de esta alternativa era importante demostrarlo e impulsarlo a un nivel de producción mayor. Lo que ahora sigue es masificar la tecnología, y adaptarla según sea el caso, a lo largo de todo el país, el cual se caracteriza por los múltiples nodos o puntos

---

<sup>17</sup> Dato obtenido de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) con corte de información al día 15 de julio de 2022 [111].

caliente identificados, y de los cuales no se contemplan las zonas geotérmicas invisibles o con puntos calientes ciegos, así como los pozos petroleros abandonados, mismos que recientemente se han estado considerando para su explotación como sistemas o reservorios térmicos con potenciales energéticos que fácilmente pueden impulsar el desarrollo agroindustrial y/o agroalimentario libre y soberano en México.





## 6 APÉNDICE

Estado de la Rep. Mexicana	No. Anomalías	No. Actividades	Destilado Agave	Destilado Invernadero			Secado
				Pasteurización	Deshidratado Invernadero	Café cereza	
Aguascalientes		67	21%	---	5.5E+03	---	---
Baja California		80	38%	---	4.2E+03	1.2E+05	---
Baja California Sur		41	26%	---	2.3E+01	---	---
Campeche		---	15%	---	---	---	---
CDMX		1	24%	---	---	---	---
Chiapas		33	41%	---	---	---	3.5E+05
Chihuahua		86	18%	---	---	3.3E+05	---
Coahuila		25	18%	---	9.5E+02	---	---
Colima		5	29%	---	---	---	3.3E+03
Durango		66	24%	---	4.9E+01	---	---
Estado de México		16	9%	1.3E+04	---	---	---
Guanajuato		201	44%	2.2E+05	8.1E+02	1.8E+05	---
Guerrero		10	32%	3.3E+03	---	---	3.9E+04
Hidalgo		123	15%	---	---	---	2.8E+04
Jalisco		530	88%	1.1E+06	4.5E+02	6.6E+04	4.6E+03
Michoacán		168	71%	2.4E+04	---	1.1E+05	---
Morelos		10	24%	1.8E+02	---	7.6E+04	---
Nayarit		145	32%	4.8E+04	---	---	1.6E+03
Nuevo León		12	12%	---	---	---	---
Oaxaca		4	38%	---	---	---	7.0E+04
Puebla		26	62%	---	---	9.5E+04	1.4E+05
Querétaro		244	15%	---	---	---	---
Quintana Roo		---	9%	---	---	---	---
San Luis Potosí		73	21%	---	---	8.1E+04	1.2E+04
Sinaloa		37	47%	1.8E+03	---	---	---
Sonora		155	44%	---	3.2E+05	---	---
Tabasco		---	12%	---	---	---	---
Tamaulipas		7	9%	---	---	1.3E+05	---
Tlaxcala		2	15%	---	---	---	---
Veracruz		12	50%	9.8E+03	---	---	2.1E+05
Yucatán		---	26%	---	---	---	---
Zacatecas		89	32%	2.2E+04	4.3E+04	1.8E+05	---
<b>TOTAL</b>		<b>2,268</b>	<b>34</b>	<b>1,439,718</b>	<b>374,058</b>	<b>1,379,091</b>	<b>858,988</b>

Fig. 31 Destilado de agave y producción de vino; Invernadero para uvas y cebolla; Pasteurización de jugo de uvas; Deshidratado de cebolla y Secado de café y cerezas

**Actividades potenciales**

Estado de la Rep. Mexicana	No. Actividades		Deshidratado					Invernadero				
	Anomalías	No	Mango	Papaya	Pera	Piña	Fresas	Frambuesas	Arándano	Tomate	Pasteurización	
Aguascalientes	67	21%	---	---	---	---	2.5E+03	---	---	---		
Baja California	80	38%	---	---	---	---	1.2E+05	1.4E+04	3.2E+03	---		
Baja California Sur	41	26%	---	---	---	---	1.6E+03	---	---	1.6E+05		
Campeche	---	15%	3.1E+04	2.8E+04	---	1.3E+03	---	---	---	---		
CDMX	1	24%	---	---	3.4E+02	---	7.0E+03	9.0E+00	8.8E+01	---		
Chiapas	33	41%	2.8E+05	1.5E+05	5.0E+02	7.7E+03	---	---	---	---		
Chihuahua	86	18%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Coahuila	25	18%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Colima	5	29%	5.9E+04	1.9E+05	---	2.9E+04	---	1.4E+01	2.7E+03	---		
Durango	66	24%	---	---	5.0E+02	---	---	---	---	---		
Estado de México	16	9%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Guanajuato	201	44%	---	---	---	---	6.7E+04	---	3.0E+02	---		
Guerrero	10	32%	3.9E+05	4.3E+04	---	5.3E+02	---	---	---	---		
Hidalgo	123	15%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Jalisco	530	88%	1.1E+05	2.5E+04	---	4.0E+04	2.2E+03	9.2E+04	1.8E+04	1.9E+05		
Michoacán	168	71%	1.6E+05	8.1E+04	1.0E+04	---	4.5E+05	2.3E+04	6.5E+03	2.8E+05		
Morelos	10	24%	---	---	2.2E+03	---	---	---	---	1.5E+05		
Nayarit	145	32%	3.2E+05	---	---	3.9E+04	---	---	4.0E+01	---		
Nuevo León	12	12%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Oaxaca	4	38%	1.9E+05	3.1E+05	2.2E+02	1.4E+05	---	---	---	---		
Puebla	26	62%	---	---	1.3E+04	---	5.0E+02	5.7E+02	9.2E+02	1.5E+05		
Querétaro	244	15%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Quintana Roo	---	9%	---	---	---	5.1E+04	---	---	---	---		
San Luis Potosí	73	21%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Sinaloa	37	47%	2.0E+05	---	---	---	3.6E+02	---	8.1E+03	1.1E+06		
Sonora	155	44%	---	---	---	---	---	---	9.6E+01	1.2E+05		
Tabasco	---	12%	---	1.3E+04	---	5.6E+04	---	---	---	---		
Tamaulipas	7	9%	---	---	---	---	---	---	---	---		
Tlaxcala	2	15%	---	---	2.1E+02	---	2.7E+02	---	---	---		
Veracruz	12	50%	9.6E+04	1.1E+05	2.1E+03	6.3E+05	---	---	---	---		
Yucatán	---	26%	---	1.8E+04	---	---	---	---	---	---		
Zacatecas	89	32%	---	---	---	---	---	---	---	1.8E+05		
<b>TOTAL</b>	<b>2,268</b>	<b>34</b>	<b>1,832,676</b>	<b>982,184</b>	<b>28,731</b>	<b>999,138</b>	<b>653,021</b>	<b>130,142</b>	<b>40,250</b>	<b>2,315,383</b>		

Fig. 32 Deshidratación de mango, papaya, pera, piña y fresas; Producción de mango, papaya, pera, piña y fresas en invernaderos y Pasteurización

Actividades potenciales

Invernadero

Estado de la Rep. Mexicana	No. Anomalías	No. Actividades	No. Actividades	Berenjena	Brócoli	Calabacit a	Coliflor	Lechuga	Melón	Papa	Pepino	Plátano
Aguascalientes	67	21%	---	1.1E+04	---	6.5E+03	5.4E+04	---	---	---	---	---
Baja California	80	38%	1.2E+02	1.1E+04	1.3E+04	2.2E+03	2.5E+04	---	---	---	5.0E+04	---
Baja California Sur	41	26%	1.9E+02	---	---	---	---	4.1E+03	8.2E+04	---	---	---
Campeche	---	15%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CDMX	1	24%	---	---	---	---	1.4E+04	---	1.7E+05	---	---	7.0E+05
Chiapas	33	41%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Chihuahua	86	18%	---	---	---	---	---	2.2E+04	6.0E+04	---	---	---
Coahuila	25	18%	---	---	---	---	---	1.5E+05	---	---	---	---
Colima	5	29%	---	---	---	---	---	1.6E+04	---	---	---	2.1E+05
Durango	66	24%	---	---	---	---	---	5.0E+04	---	---	---	---
Estado de México	16	9%	---	5.9E+03	---	---	---	---	---	---	---	---
Guanajuato	201	44%	---	4.2E+05	---	3.0E+04	1.4E+05	---	---	---	5.0E+04	---
Guerrero	10	32%	---	---	---	---	---	9.8E+04	---	---	---	7.8E+04
Hidalgo	123	15%	---	---	3.3E+04	1.9E+04	---	---	---	---	---	---
Jalisco	530	88%	---	2.0E+04	2.3E+04	1.4E+03	---	5.9E+03	5.9E+04	2.1E+04	1.8E+05	---
Michoacán	168	71%	3.4E+02	4.6E+04	3.9E+04	8.2E+03	1.6E+04	7.8E+04	3.9E+04	1.0E+05	1.6E+05	---
Morelos	10	24%	9.4E+01	---	1.8E+04	---	---	---	---	---	4.9E+04	---
Nayarit	145	32%	1.9E+03	---	---	---	---	---	---	---	---	3.1E+04
Nuevo León	12	12%	---	---	---	---	---	---	9.8E+04	---	---	---
Oaxaca	4	38%	---	---	---	---	---	1.7E+04	---	---	---	6.2E+04
Puebla	26	62%	9.8E+01	5.2E+04	6.1E+04	1.7E+04	6.8E+04	---	1.9E+05	---	---	3.7E+04
Querétaro	244	15%	---	1.0E+04	---	4.0E+03	2.7E+04	---	---	---	---	---
Quintana Roo	---	9%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
San Luis Potosí	73	21%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Sinaloa	37	47%	1.7E+05	---	6.6E+04	---	---	---	3.8E+05	3.6E+05	---	---
Sonora	155	44%	2.3E+03	2.4E+04	2.2E+05	---	1.4E+04	1.4E+05	4.2E+05	2.5E+05	---	---
Tabasco	---	12%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	6.1E+05
Tamaulipas	7	9%	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Tlaxcala	2	15%	---	1.7E+04	---	---	1.2E+04	---	---	---	---	---
Veracruz	12	50%	---	---	---	---	---	---	---	1.6E+05	---	2.8E+05
Yucatán	---	26%	4.7E+03	---	1.3E+04	---	---	---	---	---	3.6E+04	---
Zacatecas	89	32%	---	---	2.4E+04	4.8E+03	8.7E+04	---	---	---	2.7E+04	---
<b>TOTAL</b>	<b>2,268</b>	<b>34</b>	<b>179,600</b>	<b>618,378</b>	<b>514,546</b>	<b>91,910</b>	<b>458,739</b>	<b>578,860</b>	<b>1,647,940</b>	<b>949,696</b>	<b>2,339,653</b>	<b>---</b>

Fig. 33 Producción de diversas frutas y verduras en invernaderos

Estado de la Rep. Mexicana	Actividades potenciales			Envasado						Pasteurización y producción derivados	
	No. Anomalías	No. Actividades	No. Actividades	Carne en canal de ave	Carne de bovino	Carne de canal de caprino	Carne de ovino	Carne en canal de porcino	Huevo	Leche de bovino	Leche de caprino
Aguascalientes	67	21%	3.7E+05	---	---	---	---	---	---	4.2E+05	---
Baja California	80	38%	---	9.6E+04	---	---	---	---	---	---	---
Baja California Sur	41	26%	---	---	---	---	---	---	---	---	4.0E+03
Campeche	---	15%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CDMX	1	24%	---	---	9.1E+03	---	---	---	---	---	---
Chiapas	33	41%	1.9E+05	1.1E+05	---	2.9E+04	---	---	---	4.3E+05	---
Chihuahua	86	18%	---	8.5E+04	---	---	---	---	---	1.1E+06	7.2E+03
Coahuila	25	18%	---	---	3.9E+03	---	---	4.5E+04	1.4E+06	1.4E+06	4.5E+04
Colima	5	29%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Durango	66	24%	2.8E+05	9.9E+04	---	---	---	6.3E+04	1.2E+06	1.2E+06	2.6E+04
Estado de México	16	9%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Guanajuato	201	44%	2.2E+05	---	---	1.2E+05	2.3E+03	7.9E+04	8.5E+05	8.5E+05	4.4E+04
Guerrero	10	32%	---	---	3.6E+03	---	---	---	---	---	---
Hidalgo	123	15%	---	---	---	6.9E+03	---	---	---	---	---
Jalisco	530	88%	3.9E+05	2.4E+05	1.8E+03	4.4E+03	3.2E+05	1.5E+06	2.4E+06	2.4E+06	8.8E+03
Michoacán	168	71%	---	8.8E+04	2.5E+03	---	---	4.5E+04	---	---	3.9E+03
Morelos	10	24%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Nayarit	145	32%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Nuevo León	12	12%	---	---	1.6E+03	---	---	---	8.7E+04	---	3.9E+03
Oaxaca	4	38%	---	---	3.6E+03	2.3E+03	2.8E+04	---	---	---	---
Puebla	26	62%	1.9E+05	---	3.9E+03	4.4E+03	1.7E+05	4.9E+05	4.5E+05	---	---
Querétaro	244	15%	3.5E+05	---	---	2.6E+04	---	---	---	---	---
Quintana Roo	---	9%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
San Luis Potosí	73	21%	---	1.2E+05	3.9E+03	2.6E+03	9.1E+04	---	---	---	4.7E+03
Sinaloa	37	47%	1.3E+05	1.1E+05	---	---	---	6.5E+04	---	---	---
Sonora	155	44%	---	7.6E+04	---	2.8E+05	1.4E+05	---	---	---	---
Tabasco	---	12%	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Tamaulipas	7	9%	---	---	1.6E+03	---	---	---	---	---	---
Tlaxcala	2	15%	---	---	---	2.8E+03	---	---	---	---	---
Veracruz	12	50%	3.9E+05	2.6E+05	---	5.2E+03	1.4E+05	---	7.2E+05	---	---
Yucatán	---	26%	1.4E+05	---	---	---	---	1.4E+05	8.9E+04	---	---
Zacatecas	89	32%	---	---	4.8E+03	4.7E+03	---	---	---	---	6.4E+03
<b>TOTAL</b>	<b>2,268</b>	<b>34</b>	<b>2,642,021</b>	<b>1,273,901</b>	<b>31,146</b>	<b>44,595</b>	<b>1,293,112</b>	<b>2,699,347</b>	<b>9,444,090</b>	<b>153,266</b>	<b>153,266</b>

Fig. 34 Pasteurización para envasado aséptico de productos cárnicos en general y Pasteurización de huevo y leche

Estado de la Rep. Mexicana	Actividades potenciales		Actividades		Miel	Producción y productos derivados				Envasado			
	No. Anomalías	No. Actividades	No. Anomalías	No. Actividades		Atún	Camarón	Langosta	Mojarra	Acuicultura Congelado	Acuicultura Envasado	Acuicultura Congelado	Acuicultura Envasado
Aguascalientes	67	21%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Baja California	80	38%			1.4E+04	---	---	---	---	---	---	---	---
Baja California Sur	41	26%			---	4.8E+03	2.5E+03	---	---	---	---	---	---
Campeche	---	15%			8.2E+03	---	---	---	---	---	---	---	---
CDMX	1	24%			---	5.1E+03	---	---	---	---	---	---	4.9E+03
Chiapas	33	41%			5.5E+03	1.1E+03	---	---	---	---	---	---	2.8E+04
Chihuahua	86	18%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Coahuila	25	18%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Colima	5	29%			---	1.5E+04	4.3E+03	---	---	---	---	---	---
Durango	66	24%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Estado de México	16	9%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Guanajuato	201	44%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Guerrero	10	32%			2.0E+03	3.0E+02	---	6.0E+01	---	---	---	---	---
Hidalgo	123	15%			---	---	---	---	---	---	---	---	4.5E+03
Jalisco	530	88%			5.7E+03	9.6E+01	---	1.1E+02	---	---	---	---	3.6E+04
Michoacán	168	71%			---	---	---	9.8E+01	---	---	---	---	1.8E+04
Morelos	10	24%			1.9E+03	---	---	---	---	---	---	---	---
Nayarit	145	32%			---	1.1E+03	1.8E+04	1.9E+02	---	---	---	---	1.4E+04
Nuevo León	12	12%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Oaxaca	4	38%			4.4E+03	1.4E+03	1.8E+03	---	---	---	---	---	---
Puebla	26	62%			2.5E+03	---	---	---	---	---	---	---	---
Querétaro	244	15%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Quintana Roo	---	9%			3.6E+03	---	---	4.4E+02	---	---	---	---	---
San Luis Potosí	73	21%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Sinaloa	37	47%			---	6.9E+04	1.1E+05	2.2E+01	---	---	---	---	1.8E+04
Sonora	155	44%			---	---	7.1E+04	1.0E+02	---	---	---	---	7.6E+03
Tabasco	---	12%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Tamaulipas	7	9%			---	---	1.5E+04	---	---	---	---	---	---
Tlaxcala	2	15%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
Veracruz	12	50%			4.8E+03	1.2E+03	2.9E+03	---	---	---	---	---	1.2E+04
Yucatán	---	26%			1.2E+04	---	---	6.0E+02	---	---	---	---	---
Zacatecas	89	32%			---	---	---	---	---	---	---	---	---
<b>TOTAL</b>	<b>2,268</b>	<b>34</b>			<b>50,209</b>	<b>119,064</b>	<b>229,000</b>	<b>4,145</b>	<b>142,988</b>				

Fig. 35 Producción y productos derivados de la miel; Acuicultura para la cría de especies como atún, camarón, langosta y mojarra y envasado derivado de la producción de estos productos

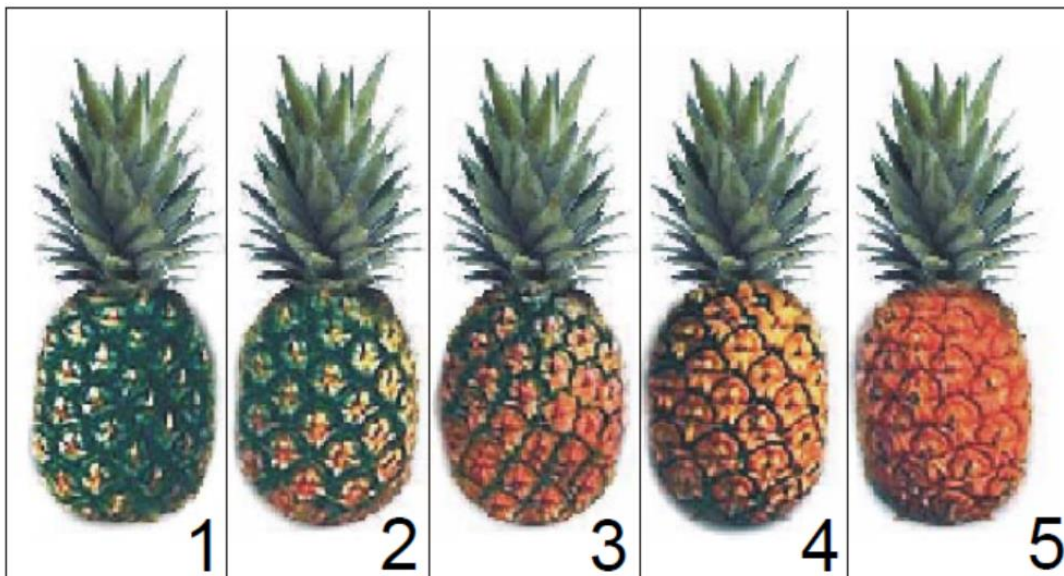


Fig. 36 Tabla para la clasificación del nivel de maduración [104]

Tabla 22 Tabla descriptiva del nivel de maduración de la piña con base en su coloración externa [104]

Número.	Designación	Descripción
1	Verde o sazona	Es aquella en la que la coloración amarilla cubre del 0 al 10% de la superficie del cuerpo de la fruta.
2	Un cuarto	Es aquella en la que la coloración amarilla cubre del 11 al 25% de la superficie del cuerpo de la fruta.
3	Media cara	Es aquella en la que la coloración amarilla cubre del 26 al 50% de la superficie del cuerpo de la fruta.
4	Tres cuartos	Es aquella en la que la coloración amarilla cubre del 51 al 80% de la superficie del cuerpo de la fruta.
5	Madura	Es aquella en la que la coloración amarilla cubre del 81 al 100% de la superficie del cuerpo de la fruta.

*Tabla 23 Tabla descriptiva de las etapas del proceso de deshidratación de piña*

<b>ETAPA</b>	<b>ETAPAS DEL PROCESO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	Recepción y selección de materia prima	Se realizó una inspección para determinar su calidad y si cumple con las especificaciones en cuanto a sanidad (ausencia de ataques de insectos, fruta malograda o podrida), variedad y estado de madurez (grados brix, textura, color, pH)
2	Almacenamiento y pesado	Después de la inspección, se pesa y se destina a almacenamiento o procesamiento, según corresponda.
3	Selección y clasificación	Se elimina la fruta magullada o con hongos. La clasificación se realiza por tamaño y estado de madurez. La fruta debe tener textura firme. La fruta madura (cuya pulpa esté muy blanda, es decir, al apretarla los dedos se hundan) se aparta.
4	Pesado	Se pesa la cantidad exacta que ingresará al proceso para determinar el rendimiento de la fruta. Se pesaron los residuos (cascara y corona).
5	Lavado y desinfección	La fruta se sumerge en una tina con agua para el lavado. De esta manera se elimina el polvo, la suciedad y otras partículas extrañas. La fruta limpia se desinfecta, se sumerge en una solución desinfectante por 5 minutos. Después del lavado con agua clorada se procede a lavar con agua potable, para eliminar cualquier residuo de cloro que pudiera haber quedado.
6	Pelado	El pelado manual se realiza sobre mesas y con cuchillos de acero inoxidable serie 300.
7	Trozado	Se cortó la fruta en trozos de igual espesor. Esto ayuda a controlar los niveles de deshidratación y contribuye a la uniformidad del producto final.
8	Cargado en charolas	Colocar las frutas en las charolas debe ser tal que no estén superpuestas, sino bien distribuidas.
9	Deshidratado	Controlar las variables de temperatura y tiempo de secado. El proceso de deshidratado oscila entre 70 a 75 °C.
10	Enfriamiento	Dejar que se enfríe a temperatura ambiente. Luego, se procede a recoger y guardar en bolsas de celofán con fuelles laterales y 25 micras (estándar).

11 Inspección

La inspección es visual para poder observar que no haya materiales extraños en el producto, tales como pelos, cáscaras de fruta, metales, etcétera.



*Fig. 37 Evaluación sensorial de piña deshidratada por parte de jueces entrenados*

### **6.1 Diseño de la cámara de deshidratación**

El diseño de la cámara de deshidratación es otro resultado del trabajo de investigación doctoral, pero se decidió no presentarlo en el cuerpo de la tesis, ya que durante el desarrollo del trabajo se perdió información valiosa. Pese a que se logró rescatar parte de esta información, misma que se presenta a continuación, se está buscando que en los trabajos futuros se vuelva a hacer la simulación para su publicación en una revista indexada junto con los resultados del mapeo térmico efectuado a la cámara de deshidratado.

La variación en el contenido de humedad en los alimentos deshidratados, para los hornos de charolas dependen de la uniformidad del flujo del aire caliente. Anteriormente, con los primeros sistemas de secado/deshidratación en el mundo, se empleaban desviadores y ventiladores, con lo que se logró mejorar en un 40% la variación de la humedad en los alimentos. Sin embargo, a pesar de esto se siguieron presentando problema en la distribución del aire caliente a través de las charolas. Y es



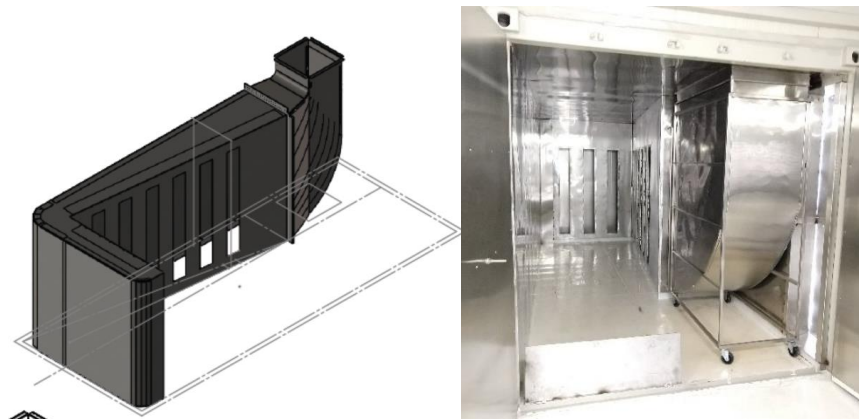
por lo anterior que para su diseño se ha recurrido a diversas simulaciones CFD para optimizar y desarrollar equipos deshidratadores, ahorrando dinero y tiempo en experimentación. La conceptualización del DGA 200 se basó en el trabajo de Amjad et al. (2015), citado en [105].

Debido a que el objetivo de la simulación fue el perfil de distribución y la variación del flujo del aire al interior y a lo largo del deshidratador, solo las partes significativas del sistema se modelaron. Teniendo en cuenta la importancia que tiene el patrón de flujo, se simuló bajo condiciones de estado estacionario. Como condición de frontera se consideró entrada del aire a 5 m/s y una temperatura de 67 °C; también se consideró turbulencia estándar (k-ε).

Para la simulación se consideró despreciable la resistencia del flujo de aire sobre la capa de alimento, debido a que las rebanadas son muy delgadas (10 mm). El modelado del sistema completo con el alimento y las charolas no es factible por la gran cantidad de recursos de software necesarios, y pese a todo no son necesarios en virtud de la buena aproximación que se obtiene del comportamiento del sistema.

### 6.1.1 Resultados de la simulación

Como se mencionó anteriormente, el diseño diagonal del sistema de distribución de aire permite homogenizar el flujo al interior del DGA 200, debido a que permite la entrada controlada de aire por los conductos a lo largo del distribuidor, como se puede ver en la Fig. 38.

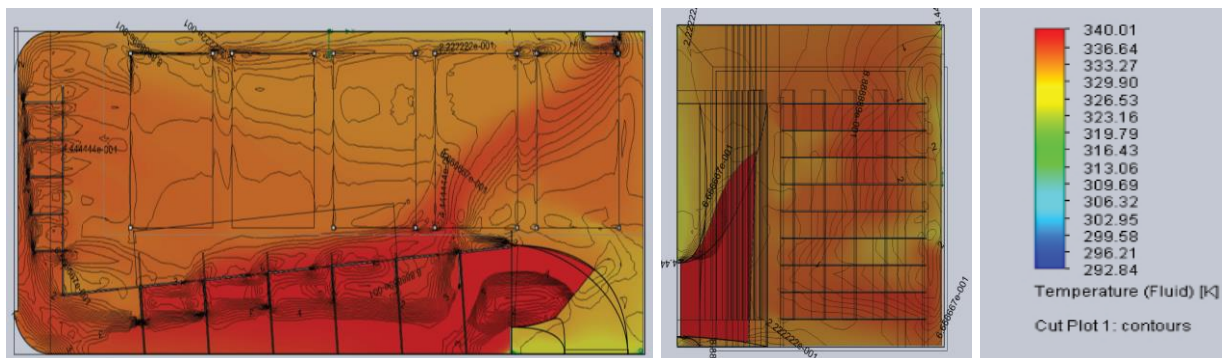


*Fig. 38 Ducto diagonal de distribución de air; izquierda. - Modelo 3D para su simulación, Derecha. - Modelo real construido después de su validación*

El aire al ingresar produce pequeños vórtices que representan zonas de baja presión, y para compensarlo la masa de aire que ingresa por el fondo del deshidratador es atraído a esas zonas, por lo que se homologa así la distribución del aire a lo largo y ancho del deshidratador. Las condiciones utilizadas para la simulación se presentan en la Tabla 24, y los resultados se pueden ver en la Fig. 39.

*Tabla 24 Propiedades del modelo 3D y configuraciones de las simulaciones*

Número de elementos	83,640,939 (flujo de aire recto) 83,021,777 (flujo de aire diagonal)
Volumen principal del sólido	38.064 m <sup>3</sup>
Tipo de mallado	3D, tetraédrico, desestructurado
Modelo de turbulencia	k-ε estándar
Discretización	viento de segundo orden
Modelo de fricción de pared	sin deslizamiento
Velocidad del aire de entrada (normal a la entrada del aire)	5.0 m/s
Entrada de flujo de masa	11.456856 kg/s
Presión de salida	0 Pa



*Fig. 39 Perfil del aire caliente en el interior del DGA 200. El ducto de distribución del aire caliente se ve en color rojo, siendo el resto el resto el espacio de deshidratado*

### 6.1.2 Validación de la simulación

La validación del correcto funcionamiento del equipo se hace con la generación de curvas de secado de cada una de las charolas al interior del horno. Sin embargo, por las dimensiones que tiene el equipo y su capacidad de producción industrial, no fue posible hacerlo a menos que se instrumentaran los espigueros y charolas para hacer el registro en tiempo real, de lo contrario, hacerlo manualmente implicaba ingresar al

horno y pesar cada charola, pero esto no era práctico ya que los tiempos de paro eran demasiado largos para que se enfriara el horno y una persona pudiera ingresar a medir. Para solucionarlo y tener parámetros de referencia, se colocaron sensores de temperatura estratégicamente para generar un mapeo térmico al interior del horno.

Los sensores utilizados fueron de la marca HOBO modelo MX2304, con un rango de funcionamiento de -40 a 100 °C. Como se puede observar, presentan un perfil similar de temperaturas, lo que indica una distribución homogénea del aire caliente, ver Fig. 40.

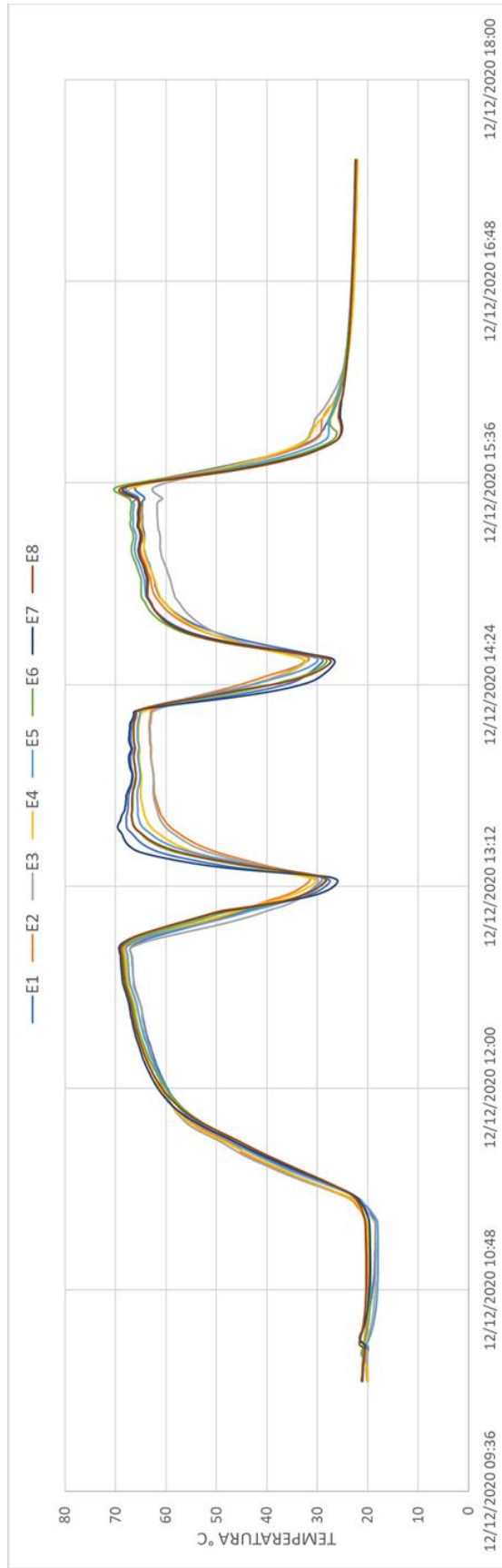


Fig. 40 Mapeo térmico a lo largo de los diferentes espigueros (E1-E8) dentro del deshidratador

## 7 REFERENCIAS

- [1] P. Mondal y A. K. Dalai, *Sustainable Utilization of Natural Resources*, Taylor & Francis Group, 2017.
- [2] Secretaria de Energía, «Sistema de Información Energética,» SENER, [En línea]. Available: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>. [Último acceso: 11 05 2020].
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura,, «fao.org,» FAO, 2020. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/>. [Último acceso: 12 05 2020].
- [4] FAO, «The State of Food and Agriculture 2019, Moving forward on food loss and waste reduction,» FAO, Roma, 2019.
- [5] ONU, Programa para el medio ambiente, «ONU: Se desperdicia 17% de todos los alimentos disponibles a nivel del consumidor.,» Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/onu-se-desperdicia-17-de-todos-los-alimentos-disponibles#:~:text=Por%20ejemplo%2C%20en%20un%20momento,antes%20del%20nivel%20del%20consumidor.>, Consultado el 4 de octubre de 2022.
- [6] H. Aviña, O. Ramos, D. González, C. Gasga y D. Rocha, «Geothermal Direct Use Methodology to Develop Sustainable Projects in Mexico and Latin America,» *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, 2020.
- [7] H. Christopher. y H. Armstead., *Energía Geotérmica*, México City: LIMUSA, 1989.
- [8] Estados Unidos Mexicanos, *Ley de Energía Geotérmica*, Cd. Mx.: DOF 11-08-2014, 2014.
- [9] P. J. Lienau y J. W. Lund, *Multipurpose Use of Geothermal Energy*, Klamath Falls: Geo-Heat Utilization Center, 1974.

- [10] J. Lund y T. Boyd, «Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. In: Proceedings World Geothermal Congress 2015,» *Melbourne, Australia.*
- [11] J. Lund y A. Toth, *Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*, Reykjavik: Proceedings World Geothermal Congress 2020, 2020.
- [12] W. Lund, E. Allen, C. Higbee, P. Lineau y W. a. S. J. Phillips, «Assessment of the geothermal potential within the BPA marketing area,» *Geo-Heat Center*, vol. 1980, p. 115, 1980.
- [13] C. Jorquera, «Estudio de viabilidad en curso para proyecto de energía geotérmica en Eslovaquia,» *Piensa en Geotermia*, 15 10 2021. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/estudio-de-viabilidad-en-curso-para-proyecto-de-energia-geotermica-en-eslovaquia/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [14] C. Jorquera, «CeraPhi avanza con demostración geotérmica para pozos de petróleo y gas,» *Piensa en Geotermia*, 24 01 2022. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/ceraphi-avanza-con-demostracion-geotermica-para-pozos-de-petroleo-y-gas/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [15] M. Salazar-Loa, «Uso de la energía geotérmica para el cultivo de hongos, experiencia en Los Humeros, Puebla, México,» *Revista Mexicana de Geoenergía*, vol. 13, nº 1, pp. 65-67, 1997.
- [16] S. Darma, Tisnaldi y R. Gunawan, «Country Update-Geothermal Energy Use and Development in Indonesia; In: Proceedings World Geothermal Congress 2010,» Bali, Indonesia, 25-30 April.
- [17] E. Pastrana-Melchor, «Aprovechamiento del calor geotérmico para el secado de madera, experiencia en Los Azufres, Michoacán, México,» *Revista Mexicana de Geoenergía*, vol. 13, nº 1, pp. 53-55, 1997.
- [18] N. Andritsos, P. Dalampakis y N. Kolios, «Use of geothermal energy for tomato drying,» *GHC Bulletin*, pp. 9-13, Marzo 2003.

- [19] C. Jorquera, «Nuevo proyecto para producir ron madurado “tropicalmente” del corazón geotérmico de Cornualles,» Piensa en Geotermia, 25 11 2020. [En línea]. Available: [https://www.piensageotermia.com/nuevo-proyecto-para-traerle-ron-madurado-tropicalmente-del-corazon-geotermico-de-cornualles/?utm\\_source=Lista+de+Piensa+en+Geotermia&utm\\_campaign=52c9c755ce-RSS\\_EMAIL\\_CAMPAIGN&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_a42515e818-52c9c755](https://www.piensageotermia.com/nuevo-proyecto-para-traerle-ron-madurado-tropicalmente-del-corazon-geotermico-de-cornualles/?utm_source=Lista+de+Piensa+en+Geotermia&utm_campaign=52c9c755ce-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_a42515e818-52c9c755). [Último acceso: 03 10 2022].
- [20] C. Jorquera, «Innovación holandesa: secado de sustrato de horticultura con tierra para macetas, utilizando calor geotérmico,» Piensa en Geotermia, 22 02 2021. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/innovacion-holandesa-secado-de-sustrato-de-horticultura-con-tierra-para-macetas-utilizando-calor-geotermico/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [21] Piensa en Geotermia, «El Salvador planea utilizar empresa geotérmica La Geo para emisión de bonos bitcoin,» Piensa en Geotermia, 05 04 2022. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/el-salvador-planea-utilizar-empresa-geotermica-la-geo-para-emision-de-bonos-bitcoin/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [22] Piensa en Geotermia, «Minería Bitcoin impulsada por la energía geotérmica en Islandia, crearán una nueva fiebre de oro?,» Piensa en Geotermia, 21 02 2018. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/mineria-bitcoin-impulsada-por-la-energia-geotermica-en-islandia-crearan-una-nueva-fiebre-de-oro/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [23] Piensa en Geotermia, «Multimillonario mexicano contempla minería de bitcoin con energía geotérmica,» Piensa en Geotermia, 03 03 2022. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/multimillonario-mexicano-contempla-mineria-de-bitcoin-con-energia-geotermica/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [24] Piensa en Geotermia, «De Larderello a Antofagasta – La relación geotérmica entre ENEL y Chile,» Piensa en Geotermia, 14 octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/de-larderello-a-antofagasta-la-relacion-geotermica-entre-enel-y-chile/>. [Último acceso: 13 05 2020].

- [25] Piensa en geotermia, «Enel da a todas sus plantas de geotermia en la Toscana sistemas de reducción de emisiones,» Piensa en geotermia, 05 enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/enel-da-a-todas-sus-plantas-de-geotermia-en-la-toscana-sistemas-de-reduccion-de-emisiones/>. [Último acceso: 13 05 2020].
- [26] A. Ormad, «Piensa en geotermia,» 10 abril 2014. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/vapori-di-birra-cerveza-100-geotermica-italia/>. [Último acceso: 13 05 2020].
- [27] C. Jorquera, «Nuevo balneario geotérmico se está construyendo en un lago de Islandia,» Piensa en geotermia, 30 octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/nuevo-balneario-geotermico-se-esta-construyendo-en-un-lago-de-islandia/>. [Último acceso: 9 06 2020].
- [28] C. Jorquera, «GDC y condado local desarrollarán conjuntamente un parque industrial geotérmico en Nakuru, Kenia,» Piensa en geotermia, 23 marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/gdc-y-condado-local-desarrollaran-conjuntamente-un-parque-industrial-geotermico-en-nakuru-kenia/>. [Último acceso: 10 06 2020].
- [29] F. Rojas, «Video reportaje de la apertura del proyecto piloto de uso directo GDC, Kenia,» Piensa en geotermia, 11 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/video-reportaje-de-la-apertura-del-proyecto-piloto-de-uso-directo-gdc-kenia/>. [Último acceso: 10 06 2020].
- [30] A. Richter, «Successful Maori-owned dairy operations utilising geothermal, New Zealand,» Think geoenergy, 24 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.thinkgeoenergy.com/successful-maori-owned-dairy-operations-utilising-geothermal-new-zealand/>. [Último acceso: 11 06 2020].
- [31] C. Jorquera, «Empresa de alimentos japonesa, invierte en una planta de procesamiento de lácteos geotérmicos en Nueva Zelanda,» Piensa en geotermia, 20 febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/empresa->



de-alimentos-japonesa-invierte-en-una-planta-de-procesamiento-de-lacteos-geotermicos-en-nueva-zelanda/. [Último acceso: 11 06 2020].

- [32] C. Jorquera, «La segunda planta lechera geotérmica de Nueva Zelanda se encuentra pronta a ser terminada,» *Piensa en geotermia*, 05 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/la-segunda-planta-lechera-geotermica-de-nueva-zelanda-se-encuentra-pronta-a-ser-terminada/>. [Último acceso: 11 06 2020].
- [33] C. Jorquera, «Nuevo parque industrial cerca de la planta geotérmica Ngawha, Nueva Zelanda,» *Piensa en geotermia*, 10 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/nuevo-parque-industrial-cerca-de-la-planta-geotermica-ngawha-nueva-zelanda/>. [Último acceso: 11 06 2020].
- [34] C. Jorquera, «NTGA aumenta el suministro de calor geotérmico de proceso a los socios industriales de Kawerau,» *Piensa en geotermia*, 15 octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/ntga-aumenta-el-suministro-de-calor-geotermico-de-proceso-a-los-socios-industriales-de-kawerau/>. [Último acceso: 11 06 2020].
- [35] rnz.nz, *Miraka's on the moove [Interview]*, Available from: [https://www.rnz.co.nz/audio/player?audio\\_id=201859581](https://www.rnz.co.nz/audio/player?audio_id=201859581), RNZ, 2017.
- [36] A. Chiasson, «FROM CREAMERY TO BREWERY WITH GEOTHERMAL ENERGY: KLAMATH BASIN BREWING COMPANY,» *Geo-Heat Center*, n° December, 2006.
- [37] SENER, «SISTEMA DE INFORMACIÓN ESTADÍSTICA SENER.,» SENER, 2021. [En línea]. Available: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>. [Último acceso: 04 10 2021].
- [38] L. Gutiérrez-Negrin, I. Canchola, J. Romo-Jones y J. Quijano-León, «Geothermal Energy in Mexico: Update and Perspectives,» *In: Proceeding World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Iceland, April 26 - May 2.
- [39] SENER, «Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026; Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_a](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_a)

s\_Renovables\_2012-2026.pdf; Consultado el 04 de mayo de 2021,» Gobierno Federal, México., Cd. Mx., 2012.

- [40] E. Iglesias, J. Torres, I. Martínez-Estrella, Reyes-Picasso y Neftalí, «Summary of the 2014 Assessment of Medium- to Low-Temperature Mexican Geothermal Resources,» *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*, 2015.
- [41] B. Jiménez, M. L. Torregrosa y L. Aboites, «El agua en México: Causes y encauses; Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>, Consultado el 11 de abril de 2021,» CONAGUA, Cd. Mx, 2010.
- [42] B. Sosa y I. Ruíz, *La disponibilidad de alimentos en México: Un análisis de la producción de 35 años y su proyección para 2050*, México: Papeles de población., 2017, pp. 207-230.
- [43] G. Eguren, C. García, N. Rivas, S. Bandeira, N. Vidal, M. Moura y F. Böcking, «Producción Agropecuaria y Conservación de los Recursos Naturales,» *Revista Plan Agropecuario*, n° 128, pp. 48-50, 2013.
- [44] Hsorka, «The companies in the Resource Park,» Hsorka, 2022. [En línea]. Available: <https://www.hsorka.is/en/about-hs-orka/resource-park/>. [Último acceso: 04 10 2022].
- [45] A. Mujumdar, S. Jangam y C. Law, *Drying of Food, Vegetables and Fruits-Volume 1*, Primera edición ed., vol. 1, Singapur, 2010.
- [46] J. Wang, *Lectures on Geothermal Resources and Development in China*, Reykjavik: UNU Geothermal Training Programme, 1992.
- [47] J. Szanyi y B. Kovács, «Utilization of geothermal systems in South-East Hungary,» *Geothermics*, vol. 39, pp. 357-364, 2010.

- [48] Oregon Institute of Technology, Geothermal Energy for Agribusiness for Klamath and Western Snake River Basins, Oregon, Klamath Falls: Geo-Heat Utilization Center, 1978.
- [49] C. Bendea, C. Antal y M. Rosca, «Geothermal Energy in Romania: Country Update 2010-2014,» *Proceeding World Geothermal Congress 2015*, 2015.
- [50] V. Svalova y K. Povarov, «Geothermal Energy Use in Russia. Country Update for 2010-2015,» *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.*, 2015.
- [51] R. Herrera, F. Montalvo y A. Herrera, «El Salvador Country Update-2010, In: Bali, Indonesia,» 25-29 April 2010.
- [52] H. BAŞAK, S. Y. MADAKBAŞ y G. GÜRDAL, «Feasibility of Vegetable Drying Technic by Geothermal Heating Turkey,» *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, vol. 1, pp. 590-595, 2014.
- [53] M. Martinovic y M. Milivojevic, «Serbia Country Update,» *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 2010.
- [54] A. Oudech y I. Djokic, «Geothermal Energy Use, Country Update for Serbia,» *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*, 2015.
- [55] L. Merida, «Curing Blocks and Drying Fruit in Guatemala,» *Geo-Heat Center Bulletin*, pp. 19-22, 1999.
- [56] M. Mburu, «Cascaded use of geothermal energy: Eburru case study,» *GHC Bulletin*, pp. 21-26, Febrero 2012.
- [57] S. Kinyanjui, «Direct use of geothermal energy in Menengai, Kenya: Proposed geothermal spa and crop drying,» United Nations University, Reykjavik., 2013.
- [58] USAID-Washington and the Kenya Geothermal Development Company (GDC), «Priority Geothermal Direct-Use Applications for Kenya: A Pre-feasibility Study for Crop Drying,» VEGA, 2013.

- [59] N. Andritsos, P. Dalabakis, G. Karydakis, N. Kolios y M. Fytikas, «Characteristics of low-enthalpy geothermal applications in Greece,» *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1298-1305, 2011.
- [60] N. Linh, C. G. Duy y N. C. Thac, «Geothermal Research and Current Development of Geothermal Energy in Vietnam,» *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.*, 2010.
- [61] N. Chaayat, C. Chaichana y F. Singharajwarapan, «Geothermal Energy Potentials and Technologies in Thailand,» *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, vol. 4, n° 2, 2014.
- [62] J. Hirunlabh, S. Thiebrat y J. Khedari, «CHILI AND GARLIC DRYING BY USING WASTE HEAT RECOVERY FROM A GEOTHERMAL POWER PLANT,» de *GHC BULLETIN*, 2004, pp. 25-27.
- [63] R. Tavisakdi, L. Suthep, A. Pongpor y P. Surachai, «Update on Thailand Geothermal Energy Reserch and Development-2000, In: Proceedings World Geothermal Congress 2000,» Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10.
- [64] U. Sumatarto, «Design of a geothermal energy dryer for beans and grains drying in kamojang geothermal field, Indonesia,» *Geo-Heat Center; Oregon Institute of Technology*.
- [65] T. Surana, J. Atmojo, Suyanto y A. Subandriya, «DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL ENERGY DIRECT USE IN INDONESIA,» *Geo-Heat Center BULLETIN*, pp. 11-15, 2010.
- [66] F. Van de Wydeven y D. Freeston, «Geothermal Energy Saving for a New Zeland Alfalfa Driying Plant,» *GEO-HEAT CENTER QUARTERLY BULLETIN*, vol. 5, n° 4, pp. 9-13, 1980.
- [67] E. Gunnlaugsson, H. Ármannsson, S. Thohallsson y B. Steingrimsson, «Problems in Geothermal Operation-Scaling and Corrosion,» *Geothermal Training Programe-United NAtions University*, 2014.

- [68] M. Hossain, B. Bala, M. Hossain y M. Mondol, «Sorption Isotherms and Heat of Sorption of Pineapple,» *Journal of Food Engineering*, vol. 48, pp. 103-107, 2001.
- [69] F. B. C. Correa, «Informe Curso Isotermas Secado UNAM,» de *Curso Taller de Secado Solar*, Temixco, Morelos, 2013.
- [70] J. Rubio, M. A. Rodriguez, J. Diez y J. Oteo, *Determinación de calores isostéricos de adsorción de vidrios silicobóricos(i)*, Madrid: Artículo Científico, 1986.
- [71] T. Chafik, «Determination of Adsorption Characteristics of Volatile Organic Compounds Using Gas Phase FTIR Spectroscopy Flow Analysis,» de *Infrared Spectroscopy- Materials Science, Engineering and Technology*, Croacia, INTECH, 2012, pp. 421-432.
- [72] C. T. Akanbi, R. S. Adyemi y A. Ojo, «Drying Characteristics and sorption isotherm of tomato slices,» *Journal of Food Engineering*, vol. 73, pp. 157-163, 2006.
- [73] A. A. Aponte, «Estimación de las Isotermas de Adsorción y del Calor Isostérico en Harina de Yuca,» *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 9, n° 1, pp. 88-96, 2011.
- [74] N. Wang y J. Brennan, «Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Potatoes at Four Temperatures,» *Journal of Food Engineering*, vol. 14, pp. 269-287, 1991.
- [75] E. Tsami, «Net Isosteric of Sorption in Dried Fruits,» *Journal of Food Engineering*, vol. 14, pp. 327-335, 1991.
- [76] F. Kaymak-Ertekin y A. Gedik, «Sorption Isotherms and Isosteric Heat of Sorption for Grapes, Apricots, Apples and Potatoes,» *Lebnsn.-Wiss. u.-Technol; Elsevier*, vol. 37, pp. 429-438, 2004.
- [77] E. Pérez-González, Estudio de la cinética de secado de frutas y verduras mediante la teoría de Polanyi aplicado al diseño de un deshidratador de bandejas., Cd. Mx.: Tesis de Maestría, UNAM, 2017.
- [78] H. A. Iglesias y J. Chirife, *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components*, Buenos Aires, Argentina: Academic Press, 1982.

- [79] K. Väkeväinen, J. Hernández, A.-I. Simontaival, P. Severiano-Pérez, G. Díaz-Ruiz, A. von Wright, C. Wachter-Rodarte y C. Plumed-Ferrer, «Effect of different starter cultures on the sensory properties and microbiological quality of Atole agrio, a fermented maize product,» *Food Control*, nº 109, 2020.
- [80] M. V. Escamilla-Morón, Evaluación instrumental de color en alimentos mexicanos tradicionales y de alto consumo., Ciudad de México: Tesis, UNAM., 2006.
- [81] M. C. Bourne, Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement, London, United Kingdom: Elsevier Science & Technology Books, 2002.
- [82] S. Sahin y S. Gülüm, Propiedades físicas de los alimentos, Zaragoza, España: Acribia S.A., 2009.
- [83] M. Terhaag y M. Benassi, «Perfil Flash: uma opção para análise descritiva rápida,» *Brazilian Journal of Food Technology*, pp. 140-151, 2010.
- [84] S. A. y C. S., «Freezing characteristics and texture variation after freezing and thawing of four fruit types,» *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 34, nº 5, pp. 517-523, 2012.
- [85] I. López-Cerino, M. Busarakorn, L. I. López-Cruz, J. Müller y M. Nagle, «Thin layer drying of Pineapple (*Ananas comosus*, L.),» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 19, nº 3, pp. 329-342, 2018.
- [86] A. Kumar, A. Begum, M. Hoque, S. Hussain y B. Srivastava, «Textural degradation, drying and rehydration behaviour of ohmically treated pineapple cubes.,» *LWT-Food Science and Technology*, nº 142, pp. 1-10, 2021.
- [87] M. Montero-Calderón, Internal quality profile and influence of packaging conditions on fresh-cut pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill), Costa Rica: Tesis doctoral., 2010.
- [88] K. Ghasemi, Y. Ghasemi y M. A. Ebrahimzadeh, «Antioxidant activity, phenol and flavonoid contents of 13 citrus species peels and tissues,» *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 22, nº 3, pp. 277-281, 2009.

- [89] P. H. S. Santos y M. A. Silvia, «Retention of Vitamin C in Drying Processes of Fruits and Vegetables—A Review,» *Drying Technology*, vol. 26, pp. 1421-1437, 2010.
- [90] W. Mühlbauer y J. Müller, *Drying Atlas, Drying Kinetics and Quality of Agricultural Products*, Duxford, United Kingdom: ELSEVIER, 2020.
- [91] J. Khazaei, G.-R. Chegini y M. Bakhshiani, «A Novel Alternative Method for Modeling the Effects of Air Temperature and Slice Thickness on Quality and Drying Kinetics of Tomato Slices: Superposition Technique,» *Drying Technology: An International Journal*, 2008.
- [92] L. Červenka, Z. Červenková y H. Velichová, «Is air-drying of plant-based food at low temperature really favorable? A meta-analytical approach to ascorbic acid, total phenolic, and total flavonoid contents,» *FOOD REVIEWS INTERNATIONAL*, vol. 34, n° 5, pp. 434-446, 2018.
- [93] D. Gómez-Rangel, *Caracterización microbiológica, fisicoquímica y sensorial de piña deshidratada mediante energía geotérmica.*, Ciudad de México: Tesis de licenciatura UNAM, 2019.
- [94] Y. Carmona-López, *Caracterización fisicoquímica, microbiológica y sensorial de frutas deshidratadas mediante energía geotérmica.*, Ciudad de México: UNAM, 2016.
- [95] B. Zanoni, C. Peri, R. Nani y V. Lavelli, «Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying,» *Elsevier Science*, vol. 31, n° 5, pp. 395-401, 1999.
- [96] A. Serdar y B. Ayse-Vildan, «Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity.,» *Food Chemistry*, vol. 210, pp. 577-584, 2016.
- [97] S. Abbasi, S. Mousavi y M. Mohebbi, «Investigation of Changes in Physical Properties and Microstructure and Mathematical Modeling of Shrinkage of Onion during Hot Air Drying,» *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, vol. 7, n° 1, pp. 92-98, 2011.

- [98] E. Horuz y M. Maskan, «Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils,» *J. Food Sci Technol*, vol. 52, pp. 285-293, 2015.
- [99] R. d. S. Simao, J. Oliveira de Moraes, R. Lemos, M. C. B. Ana Lúcia Schaidt y J. Borges, «Conductive drying methods for producing high-quality restructured pineapple-starch snacks,» *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, nº 70, 2021.
- [100] J. Shi, M. L. Maguer, Y. Kakuda, A. Liptay y F. Niekamp, «Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration,» *Food Research International*, vol. 32, pp. 15-21, 1999.
- [101] N. Benkeblia, «Antimicrobial Activity of Essential oil Extracts of Various Onions (*Allium cepa*) and Garlic (*Allium Sativum*),» *LWT*, vol. 37, pp. 263-268, 2004.
- [102] F. Hossain, «World Pineapple Production: An Overview,» *African Journal of Food Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 16, nº 4, 2016.
- [103] H. Aviña, E. Pérez-González, A. Garduño, P. E. y L. Mora, «Food Conservation with Geothermal Energy in Mexico and the World. In: Proceedings World Geothermal Congress 2020,» Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2.
- [104] SAGARPA, PC-029-2005 Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en piña, 2005.
- [105] W. Amjad, A. Munir, A. Esper y O. Hensel, «Spatial homogeneity of drying in a batch food dryer with diagonal air flow design,» *Journal of Food Engineering*, vol. 144, pp. 148-155, 2015.
- [106] K. Juhrich y F. Emissionssituation, «CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe,» Umweltbundesamt, 2016.
- [107] Piensa en geotermia, «California ve la fiebre del oro blanco por el litio de la geotermia,» Piensa en geotermia, 19 05 2021. [En línea]. Available: [https://www.piensageotermia.com/california-ve-la-fiebre-del-oro-blanco-por-el-litio-de-la-geotermia/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=california-ve-la-](https://www.piensageotermia.com/california-ve-la-fiebre-del-oro-blanco-por-el-litio-de-la-geotermia/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=california-ve-la-)



fiebre-del-oro-blanco-por-el-litio-de-la-geotermia&utm\_source=Lista+de+Piensa+en+Geotermia&utm. [Último acceso: 03 10 2022].

- [108] Piensa en Geotermia, «Litio Geotermal: Un importante valor agregado para acelerar el desarrollo de la ingeniería geotermoeléctrica en Argentina,» Piensa en Geotermia, 14 06 2022. [En línea]. Available: <https://www.piensageotermia.com/litio-geotermal-un-importante-valor-agregado-para-acelerar-el-desarrollo-de-la-ingenieria-geotermoelectrica-en-argentina/>. [Último acceso: 03 10 2022].
- [109] Touchpoint Marketing, «México cuenta con el yacimiento de Litio más grande del mundo,» Thermo Fisher Scientific, 12 09 2020. [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/mineria/extranos-elementos-de-la-tierra-ree/mexico-cuenta-con-el-yacimiento-de-litio-mas-grande-del-mundo/>. [Último acceso: 25 02 2022].
- [110] El Periódico de la Energía, «El ITER espera realizar pruebas de fusión en 2035 pese al retraso por la covid,» El Periódico de la Energía, 10 05 2021. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/el-iter-espera-realizar-pruebas-de-fusion-en-2035-pese-a-retraso-por-la-covid/>. [Último acceso: 20 06 2021].
- [111] Gobierno de México, «Consulta los precios de Petrolíferos, Gas LP y los Índices de Referencia de Precios de Gas Natural,» Gobierno de México, 2022. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cre/articulos/consulta-los-precios-de-petroliferos-gas-lp-y-los-indices-de-referencia-de-precios-de-gas-natural?idiom=es>. [Último acceso: 05 10 2022].
- [112] Gobierno de México, *Productos Alimenticios no Industrializados para Consumo Humano - Fruta Fresca - Piña (Ananas comosus var. comosus) - Especificaciones*, Ciudad de México, 2008.
- [113] Gobierno de México, *Norma Oficial Mexicana, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios*, Ciudad de México, 2009.

- [114] L. Martínez, «El Salvador apostó por el bitcoin y cumplió con pagos internacionales,» 2023 enero 24. [En línea]. Available: <https://www.adn40.mx/finanzas/el-salvador-bitcoin-pagos-internacionales-lmo>. [Último acceso: 08 02 2023].
- [115] S. Velasco y C. F. Pineda, «Grupo de Investigación en Termodinámica y Física Estadística, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Salamanca,» [En línea]. Available: [http://gtfe.usal.es/Esp/paginas\\_lineas\\_investigacion\\_publicaciones/Ensenanza\\_esp.htm](http://gtfe.usal.es/Esp/paginas_lineas_investigacion_publicaciones/Ensenanza_esp.htm). [Último acceso: 23 04 2016].