

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**“Diseño de un sistema de secado de café, mediante la utilización de un fluido geotérmico de baja entalpia como fuente térmica”**

PRESENTADO POR:

**RAUL ANTONIO HERNÁNDEZ DELGADO**

**ALVARO ENMANUEL RAMÍREZ CAÑAS**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2016

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR INTERINO :**

**LIC. JOSE LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**DIRECTOR :**

**ING. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUIMICO**

Título :

**“Diseño de un sistema de secado de café, mediante la  
utilización de un fluido geotérmico de baja entalpia como  
fuente térmica”**

Presentado por :

**RAUL ANTONIO HERNÁNDEZ DELGADO**

**ALVARO ENMANUEL RAMÍREZ CAÑAS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. JUAN RODOLFO RAMÍREZ GUZMÁN**

San Salvador, Septiembre 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. JUAN RODOLFO RAMIREZ GUZMÁN**

## RESUMEN

Es posible aprovechar el calor que se genera a partir del interior de la tierra, a esto se le conoce como Geotermia. La geotermia se manifiesta en forma de: aguas termales, geiseres, volcanes, etc. Los fluidos geotérmicos se aprovechan para la generación de energía eléctrica, para este proceso es necesario tener fluidos geotérmicos con temperaturas superiores a 100°C. Sin embargo se ha empezado a desarrollar tecnologías que aprovechan el calor en fluidos con temperaturas menores a 100°C, a los cuales se les conocen fluidos geotérmicos de baja entalpia, y este recurso de baja entalpia se encuentra en mayor cantidad comparado con los fluidos geotérmicos de mediana y alta entalpia. Existen muchos estudios sobre las aplicaciones de fluidos geotérmicos de baja entalpia, el más utilizado es para el secado de alimentos; La industria de café de El Salvador es una industria muy importante, actualmente se utilizan recursos no renovables para la obtención de calor en el área de secado mecánico del café, razón por la cual, aprovechar el recurso térmico que ofrece el planeta, se vuelve una opción prometedora. Es necesario secar el café hasta una humedad entre 10-12%, porque a una mayor temperatura el grano se degrada, mientras que si se baja demasiada la humedad el grano pierde sus propiedades organolépticas.

A partir de lo anterior, para aprovechar el calor de fluidos geotérmicos de baja entalpia, que sequen café, es necesario diseñar intercambiadores de calor especializados, y que posean una alta efectividad. Las consecuencias de utilizar el fluido geotérmico de baja entalpia se resume en incrustaciones de tuberías, y corrosión de estas mismas. Existen métodos preventivos como el manejo de la temperatura del fluido geotérmico que está directamente relacionado con la caída de presión, la cual genera incrustaciones en tuberías e intercambiadores de calor. Para el caso de la corrosión se debe hacer un estudio exhaustivo de las propiedades fisicoquímicas del fluido geotérmico de baja entalpia, para la selección de un material resistente a la corrosión.

Para el diseño de intercambiadores de calor se requiere que el aire tenga una temperatura de salida de 68°C, mientras que entra a temperatura ambiente, a una razón de 1.19 kg/s. Por su parte, el agua geotérmica entra a una temperatura supuesta de 90°C. Mediante las ecuaciones de transferencia de calor se busca optimizar el diseño del intercambiador de calor a partir de los parámetros restantes del agua geotérmica. Hay que tomar en cuenta que la temperatura de salida del agua geotérmica para un intercambiador de calor de tubo y coraza de 60 cm es de 78°C, y la del intercambiador de calor compacto de 28.4 cm es de 74°C; dichas temperaturas evitan la incrustación por sílice debido a la caída de temperatura. Se obtiene un volumen, de tubo y coraza, y el volumen del compacto.

Finalmente es posible utilizar fluidos geotérmicos de baja entalpia con los intercambiadores de calor mencionados anteriormente para sustituir las tecnologías actuales de calentamiento.

## DEDICATORIA

Dedico totalmente este trabajo de graduación a mi madre Silvia Cañas, quien ha logrado superar todos los obstáculos para brindarme este nivel de educación, infinitas gracias por ser una gran luchadora, eres única, te admiro, y Te Amo.

Doy gracias a Dios por ayudarme cuando lo necesite, y hacerme crecer mi Fé durante este proceso.

También quiero dar las gracias a mi hermano Alejandro que me apoyo en este trabajo, compartiendo su sabiduría y habilidades. Gracias a mi tía Leticia por apoyarnos siempre, a mi tía Rosa y tía Ermelinda. De igual manera doy gracias a mi familia que de una u otra manera me han apoyado.

Gracias a mis amigos por su apoyo incondicional.

A mi amigo y compañero en el trabajo de graduación Raúl Hernández, fuiste el mejor compañero de trabajo que pude haber pedido. Creo que al final somos mejores amigos que antes. Al final logramos superar todos los obstáculos.

También doy gracias a los catedráticos de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por haber compartido un poco de su conocimiento para mi formación profesional.

Y finalmente para todas aquellas personas que de una y otra manera han interactuado conmigo logrando compartir parte de su esencia, cambiando un poco de la mía y haciéndome crecer como ser humano. Gracias.

Alvaro Ramírez

## DEDICATORIA

A Dios primeramente, porque me dio la vida y sabiduría para vivir en el mundo y le agradezco por permitirme conocer a muchas personas buenas en el camino y por darme guía y fortaleza siempre que la necesito.

A mi abuela Ángela Castaneda que es una madre para mí, por darme el amor, educación y apoyo a lo largo de mi vida, por enseñarme el camino de la bondad, además le agradezco por toda la ayuda que me dio cuando más lo necesitaba, gracias mama.

A mi padre Raul Castaneda por ser el primer maestro que me mostró el maravilloso camino de la ciencia, la matemática y la religión a temprana edad, además le agradezco por enseñarme a ser una persona decidida en esta vida y sobre todo gracias padre por mostrarme con su ejemplo a siempre levantarme con una voluntad inquebrantable a pesar de las situaciones que el mundo nos manifiesta día a día.

A mi madre Julia Delgado por escucharme siempre cuando lo he necesitado gracias madre por apoyarme, además aprecio infinitamente todos los momentos en que me dio su cariño y le agradezco por enseñarme a sonreír en los momentos difíciles.

A mi hermano Edgardo Hernández por estar a mi lado siempre y ser mi mejor amigo, gracias por la ayuda que me has dado cuando siempre la he necesitado, manifiesto que te amo hermano y que daría la vida por ti sin dudarlo.

A mis hermanos Alejandra Flores, Ángel Flores, Ariana Hernández por ser cariñosos conmigo, por todos esos momentos que hemos vivido y hacerme sentir orgulloso de ser su hermano mayor.

A mis sobrinos Alejandro Gámez y Raúl Gámez, los cuales se han robado un trozo de mi corazón.

A mi amigo Ángel Flores por toda la ayuda que me ha dado sin pensarlo, por ser muy amable conmigo, gracias por los consejos que me ha dado.

A mi amigo Álvaro Ramírez por ser como un hermano a través de la carrera, agradezco por todo el apoyo que me has dado, y manifiesto que ha sido un privilegio el haber realizado nuestro trabajo de graduación.

A mis compañeros y amigos por apoyarme a través de la carrera, y finalmente gracias por todos los momentos divertidos y dificultad que hemos vivido.

Raúl Hernández

## INDICE

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Generalidades de la Geotermia y sus aplicaciones.....</b>	<b>2</b>
2.1 Orígenes de la Energía Geotérmica .....	4
2.2 Historia de la Energía Geotérmica.....	4
2.3 Tipo de Fluido Geotérmico y sus Aplicaciones.....	6
2.4 Energía Geotérmica en el Desarrollo Sostenible .....	7
2.5 La Energía Geotérmica en El Salvador.....	7
<b>3. Energía Geotérmica de Baja Entalpia.....</b>	<b>9</b>
3.1 Uso en el secado de alimentos a nivel mundial .....	9
3.2 Otros usos a nivel mundial.....	10
3.3 Usos en Latinoamérica.....	11
<b>4. Teoría para el diseño del sistema para secado de café.....</b>	<b>12</b>
4.1 Industria del café.....	13
4.1.1 Secadores de café en El Salvador.....	14
4.2 Problemas de corrosión e incrustación .....	17
4.2.1 Incrustación por Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) .....	17
4.2.2 Incrustación por sílice ( $\text{SiO}_2$ ).....	18
4.3 Tipos de Corrosión presentes en plantas geotérmicas. ....	19
4.3.1 Efectos de las especies químicas claves corrosivas. ....	20
4.3.2 Clasificación de corrosión en recursos geotérmicos. ....	22
<b>5. Metodología del diseño de intercambiador de calor .....</b>	<b>25</b>
5.1 Transferencia de calor.....	25



5.2	Generalidades de los Intercambiadores de Calor .....	25
5.2.1	Intercambiador de tubo y coraza .....	26
5.2.2	Intercambiador de Placas .....	26
5.2.3	Intercambiador de calor de tubo doble .....	27
5.2.4	Intercambiador de calor Compacto .....	28
5.3	Características de los intercambiadores de calor .....	29
5.4	Ecuaciones de diseño: Intercambiador tubo y coraza .....	31
5.5	Ecuaciones de diseño: Intercambiador compacto. ....	34
5.6	Flujogramas, códigos y graficas .....	36
5.6.1	Flujograma intercambiador de tubo y coraza.....	38
5.6.2	Gráficas y tablas de resultados: Intercambiador Tubo y Coraza.....	43
5.6.3	Flujograma Intercambiador compacto .....	45
5.6.4	Gráficas y tablas de resultados: intercambiador compacto. ....	48
<b>6.</b>	<b>Análisis de resultados.....</b>	<b>49</b>
6.1	Análisis de resultados de intercambiador tubo y coraza.....	50
6.2	Análisis de resultados de intercambiador compacto.....	50
6.3	Análisis para el diseño sistema de secado de café .....	51
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>52</b>
<b>8.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>53</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>54</b>
<b>10.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>57</b>

## INDICE TABLAS

Tabla 4.1 Propiedades fisicoquímicas del secador cilíndrico vertical.....	15
Tabla 4.2 Propiedades fisicoquímicas del secador cilíndrico horizontal rotativo. ....	16
Tabla 4.3 Propiedades fisicoquímicas de columna vertical.....	16
Tabla 4.4 Calcificación de los fluidos geotérmicos en función de la temperatura. ....	20
Tabla 4.5 Recurso geotérmico clase I.....	23
Tabla 4.6 Recurso geotérmico clase V .....	24
Tabla 5.1 Características de un intercambiador de calor compacto. ....	29
Tabla 5.2 Características de un intercambiador de calor de tubo y coraza. ....	30
Tabla 5.3 Características de un intercambiador de calor de doble tubo. ....	30
Tabla 5.4 Características de un intercambiador de placas.....	31
Tabla 5.5 Simbología de las ecuaciones de diseño del intercambiador compacto. ....	36
Tabla 5.6 Datos del flujo másico del fluido geotérmico vs Longitud del intercambiador. ..	43
Tabla 5.7 Datos de variación de la cantidad de tubos vs Longitud del intercambiador. ....	44
Tabla 5.8 Datos de flujo másico del fluido geotérmico vs razón transferencia de calor.....	48
Tabla 6.1 Datos de entrada a los intercambiadores de calor, en la sección del aire. ....	49
Tabla 6.2 Datos de entrada a los intercambiadores de calor, en la sección agua. ....	49
Tabla 6.3 Datos de salida del intercambiador de calor tubo y coraza. ....	49
Tabla 6.4 Datos de salida del intercambiador de calor compacto. ....	50
Tabla 10.1 Recurso geotérmico clase V .....	60
Tabla 10.2 Recurso geotérmico clase I.....	61
Tabla 10.3 Recurso geotérmico clase I.....	61
Tabla 10.4 Recurso geotérmico clase I.....	62

## INDICE FIGURAS

Figura 2.1 Principales capas del planeta tierra: Núcleo, Manto, y Corteza.....	3
Figura 2.2 François Larderel junto a la primera planta de energía Geotérmica en 1983 .....	5
Figura 2.3 Aplicaciones vs temperatura del fluido geotérmico.....	7
Figura 2.4 Historia de la energía geotérmica entre 1995 y 2007.....	8
Figura 3.1 Sistema de secado general para café y granos .....	10
Figura 4.1 Secador de café en batch, USA .....	12
Figura 4.2 Obstrucción por incrustación de Calcita en un segmento de tubería. ....	17
Figura 4.3 Efecto del cloruro en la corrosión uniforme de acero al carbón y otros aceros. .	22
Figura 5.1 Diagrama de las partes de un intercambiador de calor de tubo y coraza .....	26
Figura 5.2 Diagrama de las partes de un intercambiador de placas .....	27
Figura 5.3 Diagrama de las partes de un intercambiador de doble tubo .....	28
Figura 5.4 Tipos de aletas en intercambiadores de calor compactos.....	28
Figura 5.5 En este flujograma del intercambiador de calor tubo y coraza. ....	38
Figura 5.6 Flujograma del intercambiador de calor compacto. ....	45
Figura 10.1 Curva de saturación de la sílice para diferentes niveles de flasheo. ....	59
Figura 10.2 Ejemplo curva de saturación de la sílice .....	60
Figura 10.3 Propiedades termofísicas del aire.....	63
Figura 10.4 Propiedades termofísicas del agua .....	63
Figura 10.5 Factor de corrección f, para un fluido mezclado y el otro no mezclado. ....	64
Figura 10.6 Factor J, para tubos con aletas planas. ....	64
Figura 10.7 Planos en AUTOCAD del intercambiador tubo y coraza. ....	70
Figura 10.8 Planos en AUTOCAD del intercambiador compacto. ....	73

## INDICE GRAFICOS

Gráfico 5.1 Flujo másico vs Longitud en el intercambiador de tubo y coraza.....	43
Gráfico 5.2 Cantidad de tubos vs Longitud en el intercambiador de tubo y coraza.....	44
Gráfico 5.3 Flujo másico vs Razón de transferencia de calor. ....	48

## 1. INTRODUCCIÓN

La Geotermia es la energía que proviene del interior de la tierra, y se encuentra de manera abundante en El Salvador. Es posible aprovecharla para generar energía eléctrica u obtener energía térmica. Entre los usos térmicos se encuentran las aplicaciones a la industria alimenticia, específicamente para el secado de alimentos como el café. Hay que tomar en cuenta que asociado a los fluidos geotérmicos se encuentran los problemas de incrustaciones y corrosión de componentes que son parte de la planta geotermia. Es necesario desarrollar tecnologías adaptables a las condiciones que operara la planta, y buscar equipos que extraigan el calor de manera eficiente.

Para la generación de energía térmica se aprovecha los fluidos geotérmicos de baja entalpia; principalmente se utilizan estos fluidos para la industria de secado de alimentos. Entre los alimentos que necesitan secarse se encuentra el café. El grano de café necesita reducir su porcentaje de humedad de un 35% a un 10-12% para poder ser almacenado, de esta manera se guarda de posibles pérdidas en las características organolépticas de la bebida de café. Para aprovechar la energía geotérmica se diseñan tecnologías adaptadas a las condiciones de trabajo, como los requerimientos fisicoquímicos del café, o materiales para la prevención de corrosión e incrustaciones, y métodos preventivos para la inhibición de incrustaciones. Actualmente los intercambiadores de calor son calderas que utilizan combustibles fósiles para calentar aire, que seca el grano café hasta las condiciones requeridas. Una alternativa es la utilización de fluido geotérmico de baja entalpia para aprovechar el calor que poseen, y calentar aire que sea útil en el secado de café. Los intercambiadores de calor agua-aire para aprovechar el calor de los fluidos geotérmicos son: de tubo y coraza y compacto; los cuales requieren conocimientos especializados sobre transferencia de calor, y ecuaciones de diseño de las máquinas. MATLAB® es utilizado como una herramienta para facilitar los cálculos iterativos de dichas ecuaciones.

Existen metodologías que son capaces de diseñar intercambiadores de calor para las condiciones fisicoquímicas que pueda presentar un fluido geotérmico de baja entalpia, obteniendo los parámetros de aire requeridos para el secado de café.

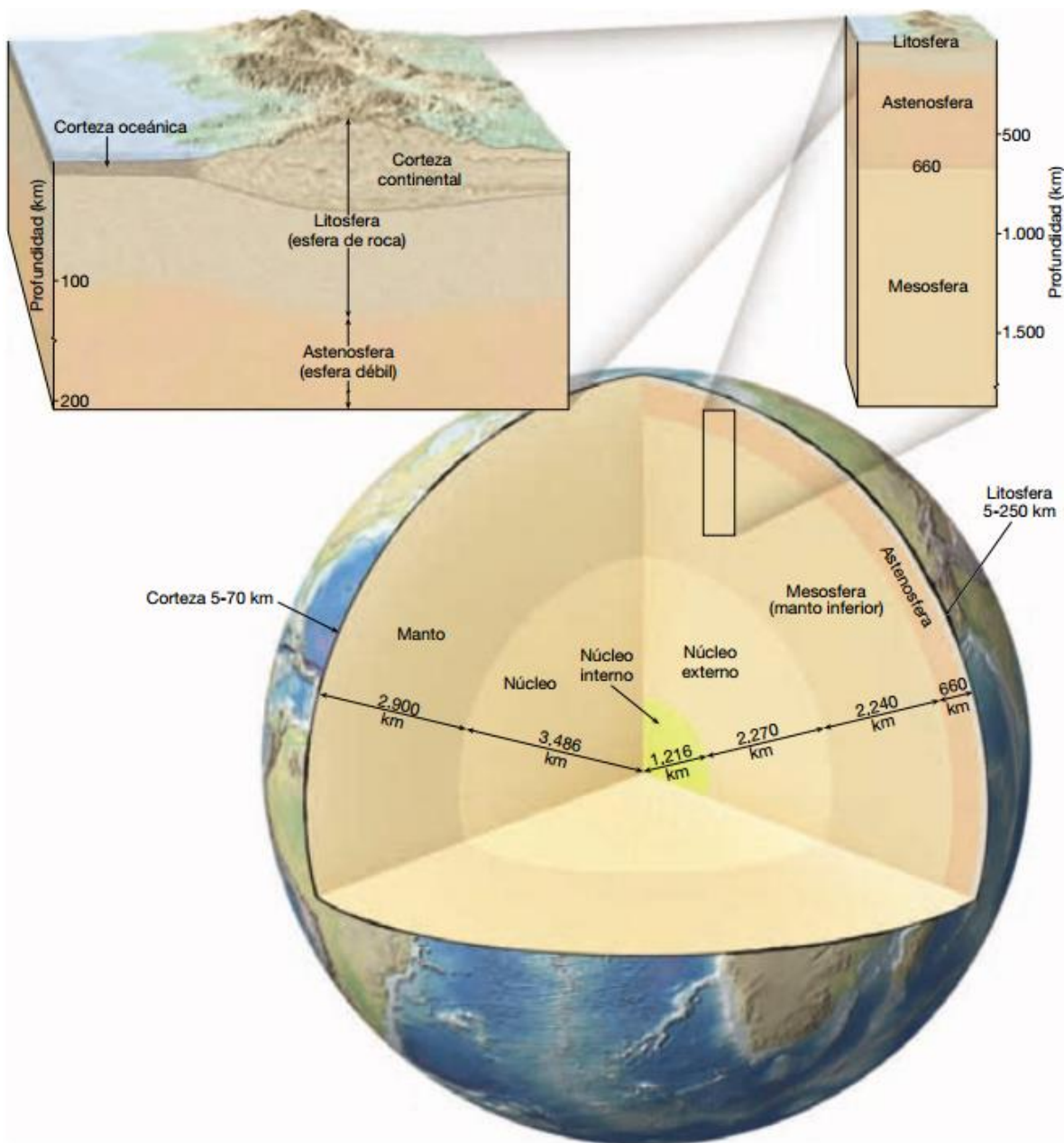
## **2. GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA Y SUS APLICACIONES.**

La demanda energética crecerá de 16424 TWh a 30364 TWh entre el periodo de 2004 a 2030. Actualmente la mayor parte de la energía eléctrica se produce a partir de combustibles fósiles, los cuales poseen dos problemas: la emisión de gases de efecto invernadero, y sus precios variables que tienen en el mercado actual. Las energías renovables son una alternativa para la producción de energía eléctrica, las cuales deben poseer las siguientes cuatro características: poder suplir la demanda energética, deben ser económicamente y tecnológicamente factibles, una amplia distribución geográfica, y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008).

Entre las energías renovables la energía geotérmica es la que cuenta con mejor desarrollo y aplicación a futuro, dicha energía se produjo desde los inicios de la tierra, aproximadamente 4,500 millones de años, cuando la Tierra era una inmensa bola ardiente de gases y polvo. La parte externa de la tierra se enfrió rápidamente, y en su interior se almacena una gran cantidad de energía, que se emite en forma de calor por los volcanes, terremotos, formación de cordilleras entre otros. La movilidad de las placas (movimiento entre la astenósfera y litosfera), y los movimientos de convección entre el manto y el núcleo externo son generados a partir del calor de la tierra (Llopis y Rodrigo, 2008).

La energía en forma de calor que se obtiene desde el centro de la tierra se denomina geotermia, término que proviene de las palabras griegas “Geo” que significa tierra, y “Thermos” que significa calor; por lo tanto, geotermia significa “calor de la tierra”(«LaGeo - Energía Geotérmica en El Salvador, centrales», 1999). También se utiliza la palabra geotermia para referirse a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta, así como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o producción de calor útil para el ser humano (Llopis y Rodrigo, 2008).

Actualmente la teoría más aceptada por la geología es la tectónica de placas, la cual es una teoría compuesta por varias ideas que explican el movimiento de la capa externa de la tierra por medio de los mecanismos de subducción y expansión del fondo oceánico, que a su vez generan los principales rasgos geológicos de la Tierra como: los continentes, las montañas y las cuencas oceánicas. La Tierra se divide en tres capas principales: manto, corteza, y núcleo, tal como explica Tarbuck et al. (2005) y se muestra en la figura 2.1. El flujo de calor interno del planeta asciende hasta la superficie terrestre con un valor aproximado  $42 \times 10^{12}$  W; el 19% proviene de la corteza, 76% del manto y 5% del núcleo. También se produce calor a partir del decaimiento de los minerales radioactivos como: uranio 238, torio 232, potasio 40, etc. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009), presentes únicamente en el manto.



**Figura 2.1** Principales capas del planeta tierra: Núcleo, Manto, y Corteza

**Fuente:** Tarbuck et al. (2005)

## **2.1 Orígenes de la Energía Geotérmica**

Las manifestaciones termales representan la prueba visual del calor almacenado en el interior de la Tierra. Tomando como ejemplo Yellowstone (Oregón, EEUU), el cual es un parque nacional y atractivo turístico, pero a su vez tiene casi todo tipo de manifestaciones hidrotermales superficiales (Prol-Ledesma 2001):

- a) Manantiales termales (balnearios), como el campo geotérmico de Los Azufres, México.
- b) Geiseres y fumarolas, como en el parque de Yellowstone.
- c) Pozas de lodo similares a las de Waiotapu, Nueva Zelanda.
- d) Pozas calientes se forman por una depresión en el lugar de los manantiales donde el agua se acumula como una alberca.
- e) Suelos vaporizantes se forman debido a la interacción del vapor que proviene de un yacimiento en el cual el fluido alcanza el punto de ebullición a cierta profundidad.

Además de estas manifestaciones hidrotermales, existen las manifestaciones termales en las que tienen lugar los volcanes, que arrojan lava, roca fundida, gases y vapores que alcanzan los 600°C. Guardan un gran peligro para la humanidad, puesto que tienden a destruir las ciudades cercanas. Liberan una gran cantidad de energía, por ejemplo el Kilauea en 1952 expulso suficiente energía para alcanzar dos quintas partes del requerimiento energético de Estados Unidos durante un periodo similar al de la erupción.

Las manifestaciones hidrotermales permiten identificar zonas en las que se puede generar energía geotérmica, además la energía geotérmica incluye el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, según sea su temperatura, profundidad y procedencia; excluye el calor en masas de aguas superficiales, continentales o marinas, las cuales pueden ser explotadas mediante bombas de calor (Llopis y Rodrigo, 2008).

La energía geotérmica puede ser encontrada en cualquier parte del mundo, pero son pocos los lugares en los que se encuentra energía con alta temperatura aprovechable para generación eléctrica (DiPippo, 2008).

## **2.2 Historia de la Energía Geotérmica**

Desde tiempos antiguos el humano ha sido atraído a las fuentes termales, las cuales utilizaban para calentarse, cocinar alimentos o simplemente bañarse. El uso de baños termales por sus propiedades curativas estuvo presente en Niisato, Japón, hasta América del Norte, utilizados por los Paleo-Indios. Tiempo después los griegos y romanos, dejaron rastro de la aplicación de la energía geotérmica, ya sea, para calefacción urbana o para baños públicos. Los romanos impulsaron el uso de la geotérmica, y en Francia 1330 ya existía una red de distribución de agua caliente; por esa época en Toscana, Italia, se extraía ácido sulfúrico concentrado y alumbre (aluminio), a partir de vapor geotérmico. Hasta el



siglo XIX se pudo cavar con mayor profundidad, y es en 1818 que se marca el inicio de la utilización industrial de recurso geotérmica, debido al descubrimiento de las sales de boro en Larderello, Toscana (Italia). El fundador de la industria geotérmica, el francés François Larderel, quien desarrolla un sistema para aprovechar el calor del fluido en un proceso de evaporación, con lo que se disminuye la deforestación de los bosques cercanos. En Francia (1833), en el barrio de Grenelle, se hizo el primer pozo artesiano de 548m de profundidad, que tardo 8 años en construirse. En 1982 Estados Unidos desarrollo la primera red local de calefacción urbana en Boise, Idaho (Llopis y Rodrigo 2008).

Entrando el siglo XX se incrementa el uso de energía geotérmica, debido al desarrollo de la humanidad, y la industria de ácido bórico en Larderello. En 1904 se da paso a la generación eléctrica a partir de vapor geotérmico, la cual entra en funcionamiento en 1913 con una potencia de 250 kW. Sin embargo, esta planta fue destruida completamente a finales de la Segunda Guerra mundial. En la figura 2.2 se muestra la primera experiencia con energía geotérmica en 1904, Larderello.



**Figura 2.2** François Larderel junto a la primera planta de energía Geotérmica en 1983

**Fuente:** Llopis y Rodrigo (2008)

Desde esos años la industria de energía geotérmica ha sido utilizada para la calefacción principalmente en países como Japón, Estados Unidos, Islandia, Francia, Italia, Hungría, Rumania, Rusia, Turquía, Georgia, y China. Al final de la Segunda Guerra Mundial, muchos países se interesaron en la energía geotérmica debido a su competitividad con respecto a otras fuentes de energía.

### 2.3 Tipo de Fluido Geotérmico y sus Aplicaciones

Los tipos de fluido geotérmico dependen del tipo de la cantidad de calor que poseen según expresan Llopis & Rodrigo (2008).

La expresión entalpía se explica de la siguiente manera:

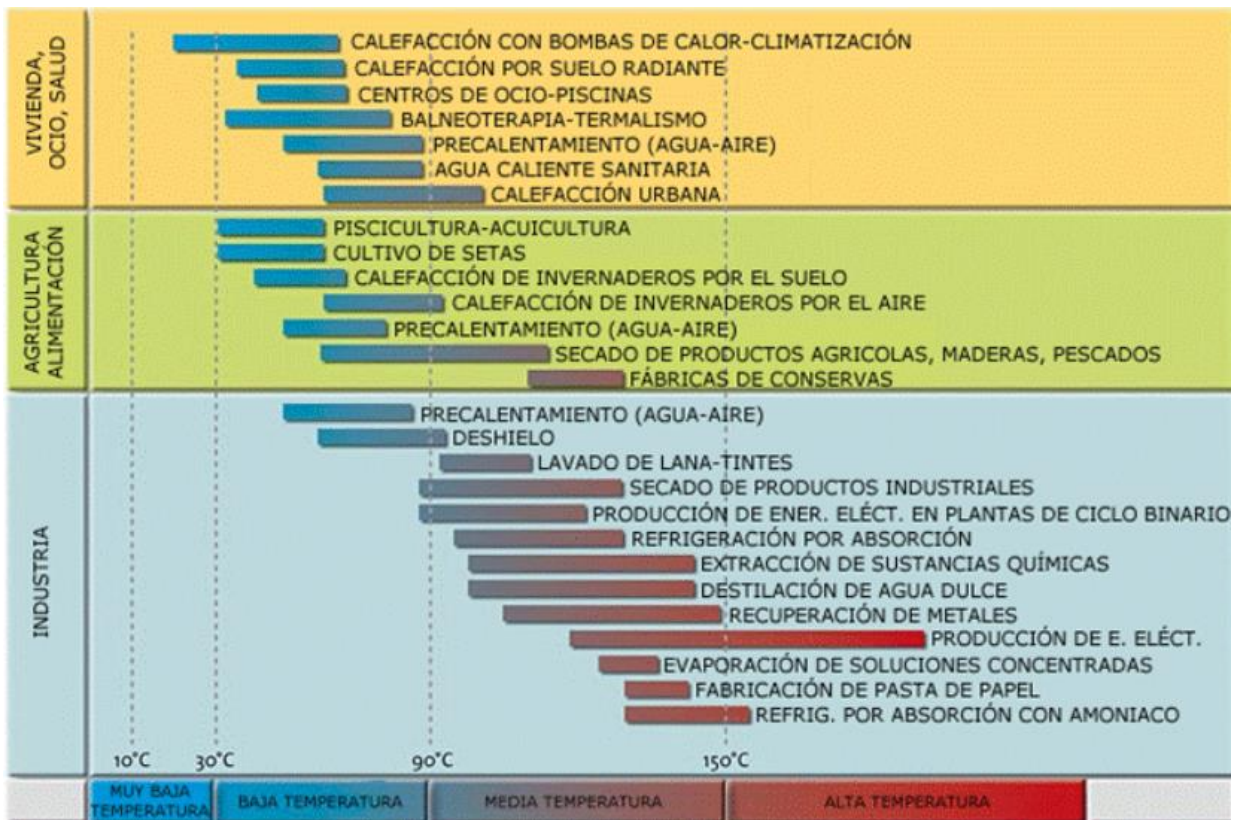
“La entalpia es la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg”

Aunque no existen aparatos para medir directamente la entalpia de un sistema, la diferencia en los tipos de fluido geotérmico se expresa a partir de la temperatura, debido a que la entalpia es considerada proporcional a la temperatura. Por ejemplo: escribir baja entalpia es similar a escribir baja temperatura.

En función de esta condición se pueden dividir en cuatro categorías:

- i. **Alta temperatura** (más de 150°C), se utiliza para generar energía eléctrica.
- ii. **Mediana temperatura** (entre 90°C y 150°C), se utiliza con otro fluido para generar energía eléctrica.
- iii. **Baja temperatura** (entre 30 y 90), se utiliza en usos térmicos.
- iv. **Muy baja temperatura** (menos de 30°C), se utiliza para bombas de calor.

Y a continuación se muestra la figura 2.3 posibles aplicaciones de fluidos geotérmicos a diferentes temperaturas.



**Figura 2.3** Aplicaciones vs temperatura del fluido geotérmico.

**Fuente:** Llopis & Rodrigo (2008)

## 2.4 Energía Geotérmica en el Desarrollo Sostenible

La energía geotérmica como energía renovable destaca, y fue parte del desarrollo sostenible antes que este término fuera creado. La energía geotérmica emite pocos gases de efecto invernadero y es parte de la lucha contra el cambio climático; otra de las ventajas es que las condiciones climatológicas no le afectan, ni el día o el viento, y además la energía geotérmica posee las siguientes características: renovable, limpia, económica, eficiente, continua, para todo el mundo, y local (Llopis & Rodrigo, 2008, pp. 33-41).

## 2.5 La Energía Geotérmica en El Salvador

El Salvador es uno de los países centroamericanos pioneros en el desarrollo de energía eléctrica geotérmica, y se está desarrollando desde los años 60's según menciona Chandrasekharam & Bundschuh (2008).

Como se muestra en la figura 2.4, la aportación energética de la geotermia a la matriz de El Salvador ha ido creciendo hasta el 2007.



**Figura 2.4** Historia de la energía geotérmica entre 1995 y 2007

**Fuente:** Rodríguez (2008)

El Salvador tiene dos campos y centrales en operación, la central geotérmica Ahuachapán y la central geotérmica Berlín en Alegría, departamento de Usulután. También están explorando y evaluando el potencial desarrollo de los campos San Vicente y Chinameca («LaGeo - Energía Geotérmica en El salvador, centrales», 1999).

La producción de energía geotérmica en El Salvador data desde 1975, con 30MW iniciales en Ahuachapán, llegando a suplir el 41% de la demanda energética en 1981. Desde 1996 la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa (CEL), ha tenido proyectos de expansión para la generación de energía geotérmica, con reformas a la legislación de electricidad. Se presentan dos campos en operación: Ahuachapán y Berlín que tienen una capacidad de 95MW y 109MW, respectivamente. La producción de energía geotérmica creció de 400GWh en 1995 a 1293GWh en 2007. Tiene un 25% de la matriz energética del país. Se están desarrollando proyectos de energía eléctrica en San Vicente y Chinameca. El principal uso de la energía geotérmica es para la generación de electricidad. Pero también puede ser usado para el secado de frutas y granos (Guidos & Burgos, 2012).

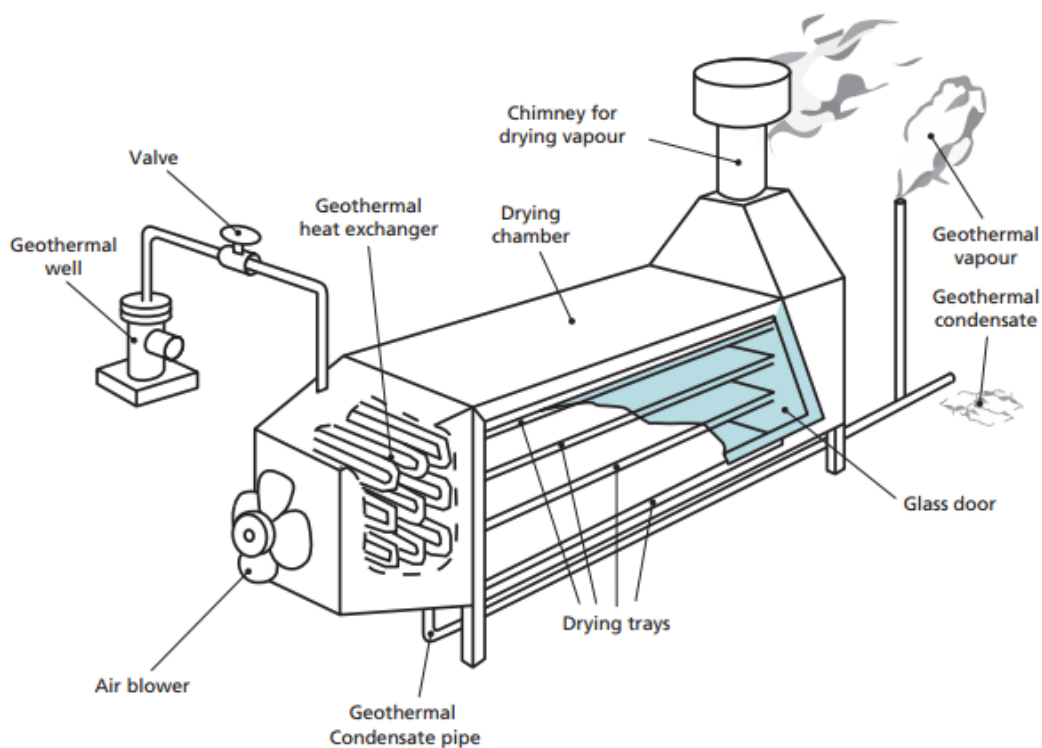
### **3. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPIA**

La energía geotérmica de baja entalpia comienza a tener un desarrollo notable actualmente, se estima que la energía geotérmica almacenada a una distancia de 3km es 43, 000,000 EJ que corresponde a 1, 194, 444,444 TWh, la cual representa menos del 1% del total de la energía del planeta, puede ser extraída con la tecnología actual, sería suficiente energía para suplir la demanda mundial. La energía geotérmica que puede ser aprovechada de sistemas geotérmicos húmedos de baja entalpia (WGS wet geothermal systems), o los sistemas geotérmicos mejorados (EGS enhanced geothermal systems), utiliza tecnologías avanzadas de intercambiadores de calor que reducen al mínimo la temperatura del fluido requerida para la generación de electricidad, logrando que las generaciones futuras tengan suficiente petróleo para explotar. El potencial de los recursos geotérmicos de baja entalpia, que son aplicables a la generación de electricidad son mayores que los recursos de alta entalpia. Los fluidos geotérmicos de baja entalpia en la antigüedad, eran usados principalmente para balnearios termales. Actualmente se está desarrollando tecnologías para el secado de productos agrícolas, por parte de los países en vías de desarrollo (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008).

#### **3.1 Uso en el secado de alimentos a nivel mundial**

El uso directo de fluido geotérmico de baja entalpia a nivel mundial se aplica principalmente al secado de alimentos, tal como mencionan Van Nguyen, Arason, Gissurarson, & Pálsson, (2015), además ha sido aplicado en países como Grecia, Hungría, Rumania, Turquía, y Macedonia; y se está utilizando en sectores agro-industriales de países como: Argelia, Kenia, Costa Rica, El Salvador, China, India e Indonesia. El secado de productos agrícolas es un proceso importante, porque se deben mantener la calidad nutricional del producto, y su disponibilidad durante todo el año. El calor utilizado en el secado puede ser obtenido directamente de pozos de baja entalpia, o recuperado de las plantas geotérmicas. En Macedonia se utiliza para secar arroz, mientras que en Grecia se seca tomate, pero también puede ser utilizado para secar productos como: cebollas, algodón, chiles, ajos y trigo, ejemplos de estos usos se mencionan a continuación:

- i. Secado de tomate y algodón en Grecia.
- ii. Secado de Chile y ajo en Tailandia.
- iii. Secado de arroz en Macedonia.
- iv. Secador de piretro, tabaco y maíz en Kenia
- v. Secado de frijoles y granos en Indonesia.
- vi. Secado de cebolla, ajo y granos en Estados Unidos.
- vii. Secado de algas y pescado en Islandia.



**Figura 3.1** Sistema de secado general para café y granos

**Fuente:** Van Nguyen et al. (2015)

### 3.2 Otros usos a nivel mundial

Una parte de la energía geotérmica de baja y mediana entalpia es utilizada para los invernaderos, Ragnarsson & Ágústsson (2014) explican que el propósito de utilizar energía geotérmica es proteger los cultivos, manteniendo un clima específico en los invernaderos, para obtener las mejores condiciones de crecimiento en las plantas.

Existen 34 países alrededor del mundo que utilizan invernaderos con fluido geotérmico de baja entalpia, el cual reduce hasta en un 80% el costo de operación. Van Nguyen et al. (2015) mencionan los trabajos realizados en los siguientes países:

- a) En Turquía los invernaderos se han vuelto muy populares para plantar tomates y chiles Californianos.
- b) Desde los 80's, los invernaderos de Grecia han sido desarrollados para plantar tomates, chiles dulces, pepinas, lechuga, ejotes, fresas y algunas hierbas también son plantadas.
- c) China produce constantemente vegetales de gran calidad.
- d) Islandia produce flores y vegetales como tomate, zanahorias, pepinos, y paprika.

Los invernaderos para flores como el desarrollado en Naivasha, Kenia, utilizan energía geotérmica directa desde 2003 y producen su propia energía eléctrica geotérmica desde 2004; esto ha tenido como resultado una reducción de costos de operación, incremento de productividad, y un incremento de mercado debido a sus producciones eco-amigables, produciendo 50 hectáreas de rosas (Mburu, 2014).

Por otro lado, el uso de fluido geotérmico de baja entalpia esta también enfocado al desarrollo de granjas de pescados, Ragnarsson (2014) menciona que para obtener el óptimo de producción en diferentes tipos de peces, se necesita un estudio específico para cada especie de pez que indique el máximo de producción con respecto a la temperatura.

Van Nguyen et al. (2015) mencionan que hay 22 países cultivando pescado con fluido geotérmico, Estados Unidos, China, Islandia, Italia e Israel son algunos de dichos países.

### **3.3 Usos en Latinoamérica.**

Desde sus inicios el humano ha estado relacionado con el fluido geotérmico de baja entalpia, mediante las piscinas termales (aguas termales), las cuales eran utilizadas como un medio refrescante en zonas de bajas temperaturas, incluso los animales han podido disfrutar de estos sistemas.

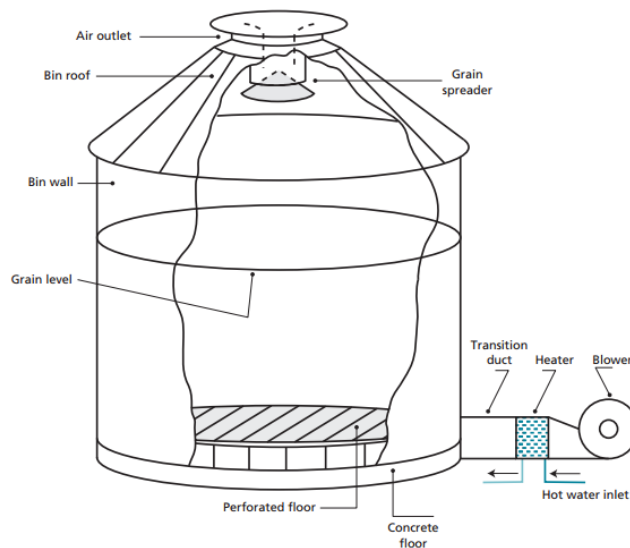
Actualmente, los baños termales tienen un enfoque en la relajación y terapia, como es el caso de Ecuador (Haraldsson & Cordero, 2014).

En Guatemala se tienen estudios para la deshidratación de frutas principalmente, en el campo geotérmico de Zunil, y La Laguna. En El Salvador hay estudios en el campo geotérmico de Ahuachapán, en 2003, como cuartos calientes o saunas, en Berlín se instaló una planta piloto para secar frutas, piscinas termales y cuartos calientes. En Costa Rica hay varios estudios en el campo de Miravalles para el secado de frutas y vegetales. En Honduras el campo de Platanares es utilizado para piscinas termales. En Nicaragua tienen piscinas termales en Tipitapa. En Panamá tienen piscinas termales en Calle de Anton. Mientras que el país que tiene mayor desarrollo de baja entalpia es México, quienes utilizan el fluido geotérmico de baja entalpia en el secado de frutas, vegetales, madera, o en invernaderos y sistemas de calentamiento de oficinas (Recinos, 2014).

#### 4. TEORÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA PARA SECADO DE CAFÉ

El café tiene una gran importancia a nivel mundial, y de igual manera en El Salvador, siendo una de las bebidas preferidas de los salvadoreños. Desde pequeños se nos enseña a tomar café, teniendo una gran variedad de formas de ser preparada y sus respectivos sabores. El sabor del café dependerá de la clase de café, el método de secado, y la preparación del mismo. A nivel industrial el proceso más importante en la calidad final de la bebida de café es el método de secado del grano, que puede ser secado natural y secado mecánico. En el secado mecánico se necesitan las siguientes maquinas: el secador, ventiladores, la banda transportadora, y el intercambiador de calor; actualmente las fuentes térmicas de los intercambiadores de calor son: combustibles fósiles, algunas ocasiones cogeneración, y en otras veces madera.

En el proceso de secado de café, los beneficios pueden obtener ahorros de energía utilizando fluido geotérmico de baja entalpia, dicho fluido se encuentra cerca de los beneficios de café en El Salvador. Para generar esos ahorros se debe de desarrollar un intercambiador de calor a partir de su diseño, que funcione con los parámetros fisicoquímicos de aire ya establecidos en los secadores de café actuales. Se agrega que el uso de fluido geotérmico de baja entalpia en tecnologías de intercambiadores de calor produce problemas de corrosión e incrustación. Por lo tanto, se deberá tomar en cuenta los siguientes aspectos: conocer los parámetros requeridos para el secado de café, reducir los problemas de corrosión e incrustación, y llevar a cabo el diseño del intercambiador de calor a partir de la teoría de transferencia de calor.



**Figura 4.1** Secador de café en batch, USA

**Fuente:** Van Nguyen et al. (2015)



#### **4.1 Industria del café**

En Etiopía fueron descubiertas las propiedades energéticas del café, cuando unas ovejas que pastaban se volvían hiperactivas luego de consumir los frutos de un arbusto. En El Salvador fue introducido a mediados del siglo XIX, por el presidente de la república de ese entonces Capitán General Gerardo Barrios, quien sembró el café en el municipio de Ciudad Barrios, donde él poseía una finca. El café fue sembrado y cosechado a lo largo del municipio y luego empezó a sembrarse en otros lugares, como Santiago de María, Berlín, municipio que actualmente tiene una producción rica de café.

El fruto del café es llamado café cereza, el cual, está compuesto por la pulpa, formada por el mesocarpio y parte del endocarpio; el color puede variar de verde, amarillo y rojo dependiendo de la variedad y estado de maduración. El mucilago o mesocarpio es una capa gruesa de tejido esponjoso de aproximadamente 0.5 mm de espesor, rico en azúcares y pectinas, rodeando a dos granos enfrentados por su cara plana. Los granos se encuentran revestidos por una doble membrana: el pergamino (endocarpio), de color amarillo pálido y de consistencia dura y frágil; la segunda, llamada película plateada más fina que la anterior y adherida al grano.

Las dos clases de grano de café cultivado mayoritariamente son el café arábigo (*Coffea Arabica*), y el café robusto (*Coffea Canephora*).

El café se vende cuando ya ha pasado varios procesos hasta obtener el café oro, sin embargo, para llegar a obtener este grano se tiene en cuenta el proceso como la siembra. Lee & Delgado (2013) explican que los frutos del café llegan a su madurez entre un periodo de 6 a 11 meses, dependiendo del tipo de arbusto sembrado. El café recién cortado se procesa por cualquiera de los siguientes métodos: seco o húmedo.

- i. En el método seco los granos se muelen para eliminar la capa exterior, el mucilago seco, la vitela y la cascara plateada. En el secado se utilizan patios o superficies de secado donde el café es colocado para ser secado a partir de la energía solar. Después de algunos días, la parte carnosa se separa. Los desperdicios pueden ser alimento para animales o bien combustible de algún proceso (cogeneración).
- ii. En el método húmedo los granos se lavan primero, luego se reducen a pulpa para quitar la capa exterior y parte del mucilago. A continuación, se fermentan los granos, en este proceso las enzimas descomponen las capas de mucilago, las aguas de este proceso son muy contaminantes. Luego de un lavado final, los granos se secan mecánicamente, para retirar la capa plateada y la vitela que produce el café en grano limpio o verde comercial.

El café puede ser secado de dos maneras: naturalmente, y mecánicamente; mientras que el secado natural requiere menor costo energético y costo de instalación de secado, el secado mecánico requiere menor tiempo y menor espacio. Se puede afirmar que el secado mecánico es una respuesta tecnológica para controlar el proceso.

El sol puede ser aprovechado para el secado de café, Gutiérrez, Sanz, Oliveros, & Orozco (2012) explican que se aprovecha la radiación directa, difusa y la energía del aire durante 4 a 7 días, con capas de hasta 2 centímetros de profundidad.

Aunque es barato el secado natural, depende de las condiciones climáticas diarias, lo que se torna cambiante día con día. De este modo, surge la idea de usar máquinas para el secado, Lee y Delgado (2013) describen el proceso de secado mecánico en el cual se toma aire del ambiente para calentarlo en un intercambiador de calor que funciona con diferentes tipos de combustibles, se conectan a ventiladores centrífugo, para un determinado caudal, para aumentar la velocidad y presión del aire cuando atraviese la masa del grano de café, ya sea estática o en movimiento, en el cual se realiza la transferencia de masa y calor que permiten obtener los parámetros del grano seco.

Es importante el secado de café pergamino debido a que este se almacena unos días o varias semanas, hasta ser trillado, empacado, y enviado a los respectivos transportes a diferentes países compradores. Se requiere que se conserve su calidad física, sensorial e inocuidad. El secado es importante en este proceso, reduciendo la humedad del grano hasta un rango de 10%-12% base húmeda, debido que a una menor humedad se pierde las características organolépticas, y a mayor humedad se producen hongos que deterioran el sabor del café. El café seco interactúa con las condiciones del lugar de almacenamiento, dependiendo de las condiciones de presión de vapor del aire que lo rodea (Gutiérrez et al., 2012).

En El Salvador las zonas de cultivos de café se encuentran en zonas montañosas, los cuales son sitios cercanos a las principales centrales geotérmicas, tal es el caso de la central geotérmica de Ahuachapán y la central geotérmica de Berlín, por lo tanto se toma como opción una aplicación para el secado de café el utilizar el fluido geotérmico de baja entalpía por la relativa cercanía.

#### **4.1.1 Secadores de café en El Salvador**

Alvarado & López (1995) explican que en los beneficios de café se pueden encontrar diferentes tipos de máquinas secadoras, las cuales sirven para procesar grandes cantidades de café pergamino húmedo. El café que se obtiene de la etapa húmeda se lleva a un presecado y luego a un secado. Los sistemas de secado usan hornos en los cuales se calienta el aire, con los gases de combustión de calderas, las cuales se alimentan con bunker.

En la sección de pre-secado se encuentra una máquina que recibe el café pergamino con un 50-55% de humedad. El café se alimenta por una tolva en la parte superior y son transportadas por un mecanismo neumático con el que se desplazan y agitan, mejorando el factor de difusividad térmica. El aire caliente es forzado a pasar a través de unas perforaciones circulares por las paredes de la tolva. Los tipos de secadores presentes en beneficios Salvadoreños son los siguientes:

**1. Secador cilíndrico vertical (tipo pacas):** Posee una columna cilíndrica vertical. Que tiene tres secciones cilíndricas circulares de acero, en la sección inferior se encuentran perforaciones circulares. Concéntrica a esta sección se encuentra un cono cilíndrico hueco, en la que se encuentran perforaciones como las mencionadas anteriormente. La parte cónica permite el descenso de granos de café hacia el área de secado. Debajo del cono cilíndrico se inyecta aire caliente por medio de un ventilador centrífugo. Los granos de café pasan por la sección anular entre las secciones circulares cilíndricas perforadas, caen dentro de un colector en forma de tolva, cuenta con una pieza llamada rascador que evita el atoramiento. Tiene una capacidad de 80 qq a 120 qq con un periodo de secado de 24 a 30 horas. Las características generales del secador se muestran en la tabla 1.

**Tabla 4.1** Propiedades fisicoquímicas del secador cilíndrico vertical.

Temperatura promedio del aire suministrado a la secadora	68°C
Humedad promedio del aire suministrado a la secadora	7%
Flujo de aire a la temperatura de entrada	1.19 kg/s
Capacidad de trabajo	4840 kg
Humedad del café de entrada	35%
Humedad del café a la salida	11-12%
Tiempo de secado	27-29 horas
Potencia eléctrica del equipo auxiliar	22.5 hp
Volumen de la sección de secado	1.226 m <sup>3</sup>
Dimensiones generales	D 3.64 x 4.06 m

**Fuente:** Alvarado & López (1995)

**2. Secadora de cilindro horizontal rotativo (Guardiola):** Es llamada así por su creador José Guardiola, fue patentada en 1882. Posee un tambor cilíndrico, con paredes perforadas que permiten la circulación del aire húmedo al ambiente. Se encuentra montado en un eje hueco por donde circula el aire caliente, y el aire es llevado cerca de los granos por un ducto axial con brazos radiales perforados. El café es descargado por ventanillas que posee la máquina. Este secador trabaja por lotes, y es conectado a un sistema de calentamiento que posee un ventilador para impulsar el aire caliente, y un intercambiador de calor para subir la temperatura del aire que se inyecta al sistema. El agua, que entra al intercambiador

de calor, es calentada por un sistema que utiliza cascarilla de café o diesel. Las características generales del secador se presentan en la tabla 2.

**Tabla 4.2** Propiedades fisicoquímicas del secador cilíndrico horizontal rotativo.

Temperatura promedio del aire suministrado a la secadora	61°C
Humedad promedio del aire suministrado a la secadora	7%
Flujo de aire a la temperatura de entrada	4.144 kg/s
Capacidad de trabajo	3637-3773 kg
Humedad del café de entrada	30.5%
Humedad del café a la salida	11-13%
Tiempo de secado	25-26 horas
Potencia eléctrica del equipo auxiliar	12.5 hp
Volumen de la sección de secado	10.998 m <sup>3</sup>
Dimensiones generales	D 1.85 x 4.9 m

**Fuente:** Alvarado & López (1995)

**3. Secador de columna vertical:** posee un buen funcionamiento y fácil operación. El café es transportado por un tornillo helicoidal que se despergamina el café. Aunque se puede evitar esto mejorando los tornillos helicoidales y evitando que se maltrate el grano de café. Los granos de café se mueven en contracorriente con respecto al flujo de aire caliente, dentro de dos columnas con persianas, que operan como secado por gravedad. Al final se encuentra un transportador de cangilones que eleva los granos y forma un circuito con el café, en forma de recirculación. El aire es calentado con diesel, leña, kerosene, o gas natural. Las características generales del secador se presentan en la tabla 3.

**Tabla 4.3** Propiedades fisicoquímicas de columna vertical

Temperatura promedio del aire suministrado a la secadora	86°C
Humedad promedio del aire suministrado a la secadora	3.5%
Flujo de aire a la temperatura de entrada	4.48 kg/s
Capacidad de trabajo	11337.87 kg
Humedad del café de entrada	30-35%
Humedad del café a la salida	11-13%
Tiempo de secado	36-39 horas
Potencia eléctrica del equipo auxiliar	7.5 hp
Volumen de la sección de secado	6.604 m <sup>3</sup>
Dimensiones generales	9 x 6 x 1.04 m

**Fuente:** Alvarado & López (1995)

Los autores Alvarado & López (1995) mencionan en sus conclusiones que los equipos de generación de calor son ineficientes y pueden llegar del 20 hasta al 50% de su eficiencia.

Según lo escrito anteriormente, el uso de fluido geotérmico de baja entalpia sería el uso de equipos eficientes que sustituyan los que se ocupaban en esos días, desde el punto de vista económico, eficiencia de equipo y espacio, etc.

#### **4.2 Problemas de corrosión e incrustación**

Los problemas de corrosión e incrustación son estudiados de manera extendida por Shannon (1975), y él ha encontrado en todas las plantas geotérmicas alrededor del mundo, y en diversos grados, afecta negativamente a los tiempos de vida de las plantas y la producción de energía, lo cual se traduce en pérdidas económicas. Las consecuencias que llevan consigo el uso de fluidos geotérmicos, van desde la corrosión de tuberías y maquinaria de una planta geotérmica, hasta la obstrucción de pozos y tuberías por incrustación de diversos minerales que precipitan desde el fluido geotérmico (ver figura 4.2). El término incrustación se refiere en general al depósito de minerales provenientes del agua geotérmica o salmuera que contiene moléculas en suspensión, que no pueden ser disueltas en el agua por estar sobresaturada con respecto a ese mineral. Cada sistema geotérmico tiene diferentes problemas de incrustación, debido a la distinta composición, cantidad y carácter físico del agua geotérmica.



**Figura 4.2** Obstrucción por incrustación de Calcita en un segmento de tubería.

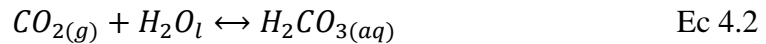
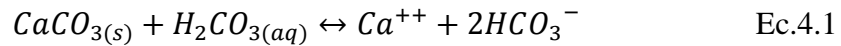
**Fuente:** (Vaccaro, 2014)

Existen diferentes tipos de incrustaciones en los campos geotérmicos y su comportamiento dependerá de las condiciones de precipitación. Los dos tipos de incrustaciones principales son: incrustación por calcita, incrustación por sílice.

##### **4.2.1 Incrustación por Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )**

Según explica Shannon (1975) las incrustaciones por calcita tienen solubilidad retrograda, eso significa que su solubilidad aumenta al disminuir la temperatura. Sin embargo la solubilidad de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) depende de gran medida del contenido del Dióxido de

Carbono ( $\text{CO}_2$  (g)) en el agua, además cabe destacar que el  $\text{CO}_2$  es el gas no condensable con más presencia en los sistemas geotérmicos. Las siguientes ecuaciones estequiométricas (**ecuación 4.1 y ecuación 4.2**) especifican equilibrio químico de la calcita con el Dióxido de carbono.



Como se observa, si en la ecuación 4.2 se disminuye la concentración de  $\text{CO}_2$ (g) la reacción se equilibrara hacia la izquierda, y la concentración del ácido carbónico disminuirá, aumentando así el pH del fluido geotérmico, ocasionando la precipitación del  $\text{CaCO}_{3(s)}$  e incrustación en las paredes de las tuberías o por donde recorra el fluido geotérmico.

Entre las soluciones a los problemas de calcita se destacan las siguientes:

- i. La calcita no puede depositarse por el simple enfriamiento de la solución.
- ii. A cualquier temperatura la calcita se puede depositar por la liberación del  $\text{CO}_2$ (g).
- iii. La incrustación de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) es muy probable que ocurra en la producción desde depósitos de baja temperatura con alto contenido de  $\text{CO}_2$  en donde la calcita es más soluble.
- iv. La incrustación de calcita es más rápida que la de la sílice.

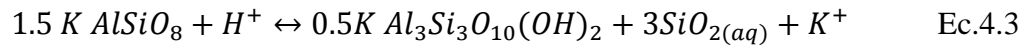
El control de la incrustación de calcita se puede lograr a partir del método de Melara (2011), que se plantea a continuación:

- a. Actuando sobre el equilibrio del carbonato y bicarbonato (pH y control sobre la presión parcial del  $\text{CO}_2$ ), por medio de la inyección de ácido a la salmuera o en el pozo utilizando bombas de fondo de pozo.
- b. Limpieza mecánica periódica.
- c. Uso de productos inhibidores de incrustación de calcita.

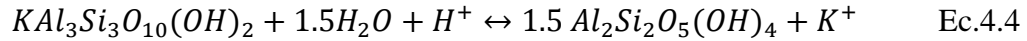
#### **4.2.2 Incrustación por sílice ( $\text{SiO}_2$ )**

La sílice  $\text{SiO}_2$  es altamente soluble en agua y vapor a presión, además su solubilidad aumenta con la temperatura, Shannon (1975) menciona que por lo general la sílice se encuentra en los fluidos geotérmicos en sus siguientes formas: quartz, cristobalita y sílice amorfa siendo esta última muy soluble en comparación de las otras formas.

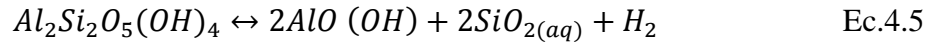
La hidrólisis del K-feldspato aporta principalmente sílice, mediante las siguientes ecuaciones de equilibrio:



K-feldespato                      Mica                                      Sílice



Mica    Caolinita



Caolinita    Sílice

Para los recursos geotérmicos de baja temperatura Ellis, Collins, Keeney, Kirk, & Conover (1983), explican en su libro que raras veces ocurren problemas de incrustación por sílice, aunque pueden ser evitados (ver Anexos B); pero de encontrarse problemas de incrustación solo se puede utilizar métodos mecánicos para la remoción de sílice.

### 4.3 Tipos de Corrosión presentes en plantas geotérmicas.

La corrosión es el proceso de degradación de materiales, y se puede disminuir haciendo una elección eficaz de materiales para que estos impactos corrosivos no degraden los componentes metálicos con los que cuenta una planta geotérmica para su funcionamiento. Los tipos de corrosión que se citan a continuación son los que se pueden encontrar en general en un campo geotérmico general (Shannon, 1975):

- i. Corrosión uniforme es la pérdida de materiales y el adelgazamiento de la pared, esto ocurre cuando el metal es incapaz de soportar un esfuerzo mecánico, por lo general se busca la selección de materiales que formen una película delgada de óxido la cual brinda una protección extra al material.
- ii. Corrosión Galvánica ocurre cuando se colocan dos metales en contacto eléctrico en una salmuera, configurando análogamente una celda galvánica. La corrosión se acelera en el metal menos noble en proporción a las áreas de superficie. El hierro es anódica al cobre y toda la corriente anódica se concentra en los remaches de hierro, la mejor estrategia para evitar este tipo de corrosión es evitar este tipo de parejas no compatibles.
- iii. Corrosión por grietas y picaduras ocurre en metales como el acero austenítico inoxidable, aluminio, titanio, los cuales dependen de una película protectora pasiva para resistencia a la corrosión. Bajo ciertas condiciones la película sufre rupturas localizadas, generando así células galvánicas que se configuran en la misma pieza de metal. A menudo, las picaduras se asocia con cambios en la química (como gradientes de oxígeno) entre el medio ambiente.
- iv. Corrosión por fricción y erosión ocurre cuando la abrasión mecánica elimina la película protectora en un metal, generándose así una corrosión acelerada.

- v. Corrosión intergranular ocurre en algunos medios de comunicación como por ejemplo un segmento de tubería. Los límites de grano son menos resistente que el resto del grano del segmento de tubería y es donde la corrosión puede proceder a lo largo de estos caminos menos resistentes a una alta velocidad.
- vi. Corrosión por fatiga ocurre cuando se tienen esfuerzos cíclicos y un medio corrosivo en un segmento metálico, en consecuencia la resistencia a la fatiga disminuye con el tiempo.
- vii. Oxidación a altas temperaturas es una reacción química en fase gas, directo entre el metal y las especies corrosivas.
- viii. Corrosión Dulce ocurre cuando el CO<sub>2</sub> está disuelto en el agua y dependiendo de la presión parcial, puede bajar considerablemente su pH de la solución.

Según mencionan Ellis et al.(1983), las principales especies químicas claves corrosivas presentes en los fluidos geotérmicos son: Oxígeno, ion de hidrogeno (pH), especies de dióxido de carbono, especies de sulfuro de hidrogeno, especies de amoniaco y los iones de cloruro y sulfato. Las distribuciones de estas especies en los recursos de vapor, dominante y líquido dominante se resumen en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4** Calcificación de los fluidos geotérmicos en función de la temperatura.

Parámetro	Recurso de alta temperatura Vapor dominante	Recurso de alta temperatura Líquido dominante	Recurso de baja temperatura
pH		2.0-10.2	6.7-10.25
Dióxido de Carbono (ppm)	290-200,000	47-25,500	12-600
Sulfuro de Hidrogeno (ppm)	5- 1600	2-625	0.03- 5
Cloruro (ppm)	0.1 - 20	18-155,000	8-530
Amoniaco (ppm)	9-1660	0.02-410	0.4-0.7
Sulfato (ppm)	Rastro-25	8-335	2-2340

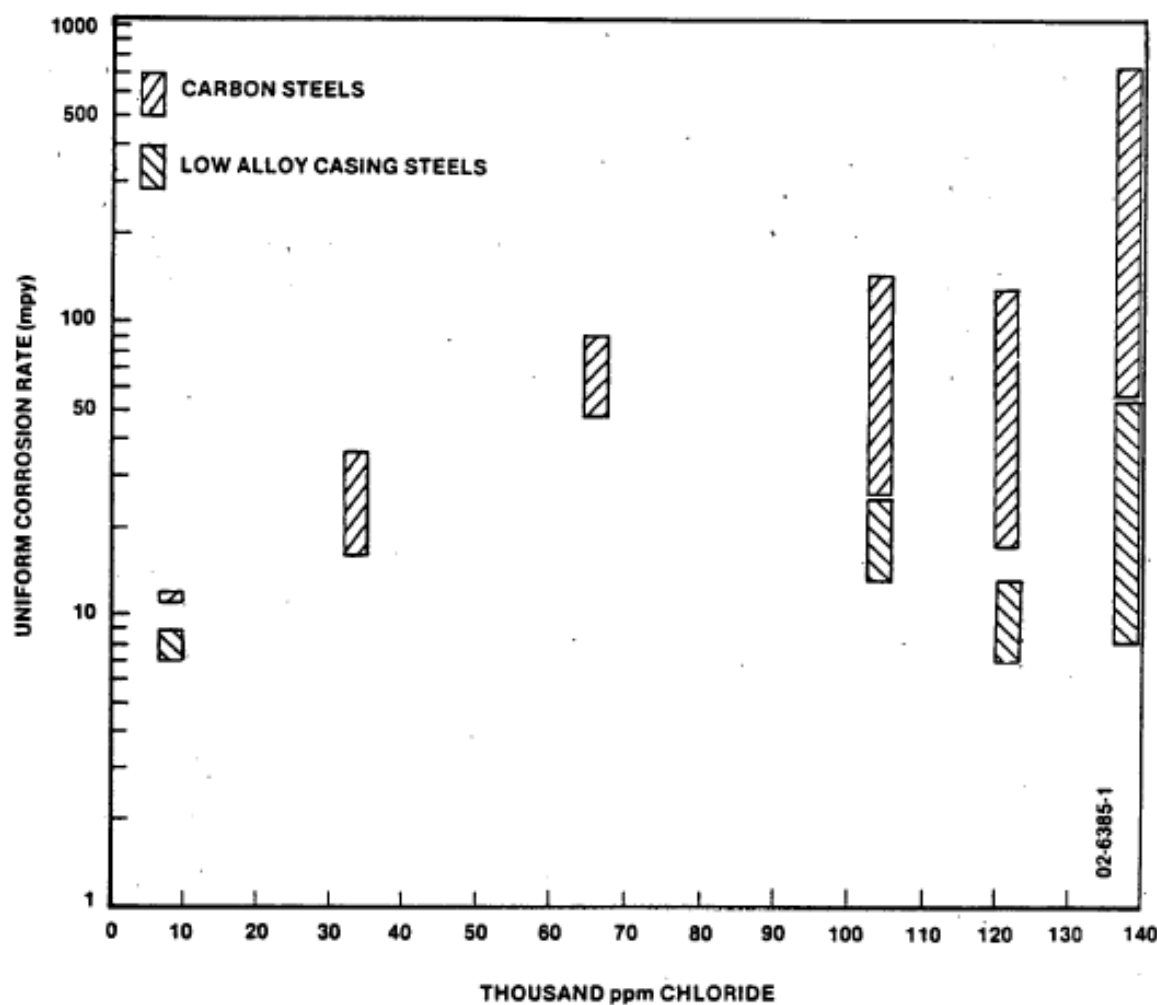
**Fuente:** Ellis et al.(1983)

#### 4.3.1 Efectos de las especies químicas claves corrosivas.

La presencia de cada especie química clave corrosiva trae por consecuencias diferentes formas de dañar a un material de construcción que puede encontrarse en una planta geotérmica en particular, a continuación se expondrán los efectos que estas especies son capaces de realizar individualmente, según el estudio realizado por Ellis & Conover (1981) se tiene:



- i. Oxígeno es el contaminante más peligroso entre todas las especies químicas claves corrosivas, y no existe en equilibrio con el sulfuro de hidrogeno por lo tanto no está presente naturalmente en los fluidos geotérmicos, sin embargo su presencia se debe a la aireación del fluido geotérmico. Además el oxígeno es el causante del incremento de la corrosión uniforme en el acero al carbón, la presencia de solamente 30ppb puede cuadruplicar la razón de corrosión del acero al carbón, además la razón de la corrosión uniforme en otros materiales es menos conocida. La presencia del oxígeno puede causar corrosión localizada, generando así corrosión por grietas y picaduras, sin embargo los materiales de aluminio y sus aleaciones necesitan bajas concentraciones para mantener la película de óxido protectora.
- ii. Ion hidrogeno (pH) es controlado en la mayoría de ambientes geotérmicos libres de oxígeno, la corrosión del acero al carbón y sus diferentes aleaciones, la corrosión de los aceros decrece al aumentar el pH. La caída del pH incluso puede ocasionar agrietamiento por corrosión bajo tensión y también corrosión por grietas y picaduras.
- iii. Ion cloruro puede causar corrosión uniforme en aceros al carbón y aleaciones de este tal como se aprecia en la figura 4.2, además también puede causar corrosión por picaduras y agrietamiento por corrosión bajo tensión.
- iv. Sulfuro de Hidrogeno ( $H_2S$ ) ataca a ciertas aleaciones de cobre y níquel. Estos metales han obtenido buenos resultados en el agua de mar, pero son prácticamente inutilizables en los fluidos geotérmicos que contienen sulfuro de hidrógeno. El umbral de ataque es de menos de 30 ppb de sulfuro de hidrógeno.
- v. Especies de dióxido de carbono esta naturalmente disuelto en muchos de los fluidos geotérmicos, además tiene un mayor efecto corrosivo en el acero al carbón y aleaciones de acero, el dióxido de carbono es una de las especies más importantes para el control del pH en los fluidos geotérmicos.
- vi. Especies de Amoniaco generan agrietamiento por corrosión bajo tensión en muchas aleaciones de cobre, y puede incrementar levemente la corrosión en el acero al carbón.



**Figura 4.3** Efecto del cloruro en la corrosión uniforme de acero al carbón y otros aceros.

**Fuente:** Ellis et al. (1983)

#### 4.3.2 Clasificación de corrosión en recursos geotérmicos.

Los fluidos geotérmicos contienen especies químicas que pueden ser muy corrosivas en materiales metálicos de construcción, y además pueden presentar variaciones en las concentraciones de las especies químicas claves corrosivas dependiendo de la temperatura del recurso geotérmico (tal como se observa en la Tabla 4.5), y el sitio en que se encuentren.

Para estudiar el fenómeno de corrosión en diferentes condiciones que puede presentar un fluido geotérmico en particular Ellis et al. (1983), proporcionan una clasificación de los fluidos geotérmicos en función de la fase dominante líquido o gas, con el propósito de proporcionar al ingeniero de diseño un conocimiento en base a la experiencia de algunos

sitios en el mundo de cómo será el comportamiento corrosivo, que pueda tener un fluido geotérmico en los materiales como acero al carbón, aleaciones entre otros.

Existen tablas que fueron desarrolladas por los autores mencionados anteriormente, dichas tablas son generadas a partir de los estudios realizados en sitios que se mencionan dentro de las mismas tablas, aunque también existen diagramas para fluidos geotérmicos de mediana entalpia (ver Anexo C); mientras que las tablas para fluido geotérmico de baja entalpia se presentan a continuación:

**Tabla 4.5** Recurso geotérmico clase I

Definición de parámetros:	
Tipo de recurso	Líquido dominante.
Total de especies Clave	1,000 a 10,000 ppm
Fracción de cloruros en las especies clave	No establecido
pH (fluido sin flasheo)	Menor a 4.5
pH (Fluido flasheado)	Menor a 4.5
Volumen de gas en el vapor	No establecido
Temperatura de entrada a la planta	250-350 °F
Sitios de estudio:	
✓ Japón - Matsukawa	
Corrosión observada en el acero al carbón.	
✓ En base al pH la razón de corrosión del fluido separado no aireado deberá exceder los 50 mpy. Sin datos disponibles.	
✓ La razón de corrosión en vapor separado no aireado esta entre 20 a 25 mpy con corrosión de grieta.	

**Fuente:** Ellis et al. (1983)

**Tabla 4.6** Recurso geotérmico clase V

Definición de parámetros:	
Tipo de recurso	Líquido dominante.
Total de especies Clave	Menor a 5000ppm
Fracción de cloruros en las especies clave	3 a 72 por ciento
pH (fluido sin flasheo)	Mayor que 6.5
pH (Fluido flasheado)	No aplicable
Volumen de gas en el vapor	No aplicable
Temperatura de entrada a la planta	120-220 °F
Sitios de estudio:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Islandia - LTA (15 sitios)</li> <li>✓ USA - Klamath Falls</li> <li>✓ USA - Madison Aquifer, SD (3 sitios )</li> </ul>	
Corrosión observada en el acero al carbón.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ En un fluido no aireado o sin presencia de Oxígeno, con un pH mayor que 9, la razón de la corrosión uniforme es típicamente menor a 1 mpy.</li> <li>✓ En un fluido no aireado con un pH entre 6 y 9 la razón de la corrosión uniforme es típicamente de 1 a 5 mpy.</li> <li>✓ En fluido no aireado la corrosión por picaduras esta entre el rango de 0 a 30 pmy.</li> <li>✓ La aireación del fluido geotérmico de baja entalpia puede causar hasta un aumento de 10 veces la velocidad de corrosión.</li> </ul>	
Rendimiento general de otras aleaciones:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ En fluido no aireado la corrosión uniforme del cobre en servicios de transferencia de calor es desde 1 a 10 mpy con severa corrosión de grietas, latones y cuproníquel son menos adecuados que el cobre para la transferencia de calor.</li> <li>✓ El acero inoxidable tipo 316 es resistente a la corrosión uniforme, picaduras y corrosión de la grieta y la corrosión bajo tensión en muchas aplicaciones.</li> </ul>	

**Fuente:** Ellis et al. (1983)

A partir de lo descrito por Ellis & Conover (1981), los fluidos geotérmicos de baja entalpia se utilizan para procesos de calefacción, calentamiento de agua para usos domésticos o el suministro de calor para un proceso, generando problemas de corrosión, debido a la notable cantidad de especies químicas presentes en estos, tal como mencionan.

Los fluidos geotérmicos de baja entalpia tienden a ser muy alcalinos como se muestra en la tabla 4.6. La selección de materiales para el diseño de un equipo de intercambio de calor es complicado, los materiales estándares no son compatibles con las propiedades que pueda tener un recurso geotérmico de baja temperatura. Los materiales más utilizados para sistemas de intercambio de calor de fluidos geotérmicos de baja temperatura son el cobre y aleaciones de cobre y níquel.

## **5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR**

La metodología a utilizar es la que presenta el autor Incropera (2007), la cual posee 9 pasos que se describen continuación:

1. Identificar la aplicación, y parámetros de funcionamiento como: temperaturas, flujos máxicos, etc.
2. Decidir el tipo de Intercambiador a utilizar según la bibliografía.
3. Evaluar el método a utilizar: LMTD (diferencia logarítmica media), o NTU(numero de transferencia de unidades).
4. Determinar las dimensiones.
5. Evaluar el coeficiente de convección en el lado caliente.
6. Evaluar el coeficiente de convección en el lado frío.
7. Determinar el coeficiente total de transferencia de calor
8. Determinar las dimensiones. Iterar si es necesario.
9. Revisar el consumo eléctrico.

Para llevar a cabo estos pasos, se necesita conocer sobre las ecuaciones de transferencia de calor que rigen cada intercambiador.

### **5.1 Transferencia de calor**

Los métodos más utilizados para el diseño de intercambiadores de calor de distintos tipos son: LMTD y NTU; ya que se consideran los métodos más prácticos y con mejores resultados.

- i. Método LMTD: es un método básico para el diseño de un intercambiador de calor a partir del conocimiento de las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos, el flujo máxico de los fluidos. Para completar el diseño se requiere los parámetros de dimensionamiento como tuberías y aletas según sea el caso del tipo de intercambiador a diseñar.
- ii. Método NTU: método que se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor, relaciona la razón de transferencia de calor real con respecto a la transferencia de calor máxima posible que pueda alcanzar el intercambiador.

### **5.2 Generalidades de los Intercambiadores de Calor**

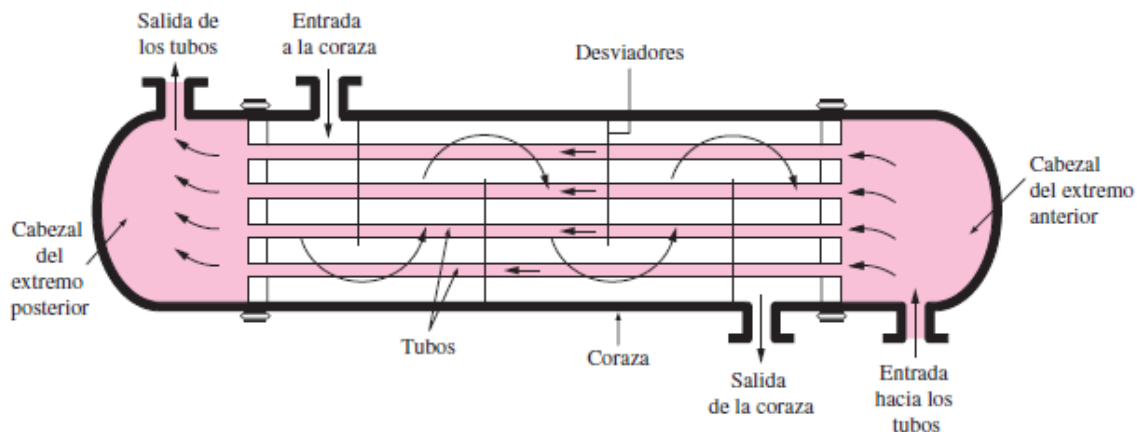
La aplicación de los principios de transferencia de calor al diseño de un equipo a fin de cumplir con cierto objetivo ingenieril es muy importante, ya que al aplicar los principios al diseño, el ingeniero trabaja en la importante meta del desarrollo de un producto para beneficio económico. Además las distintas aplicaciones de la transferencia de calor requieren diferentes tipos de accesorios y configuraciones del equipo para dicha

transferencia según manifiesta Cengel (2007), además el intento de acoplar los accesorios para la transferencia de calor a cada tipo de necesidades dentro de las restricciones específicas, ha conducido a numerosos tipos de diseños innovadores de intercambiadores de calor, tal como se muestra los más comunes a continuación.

### 5.2.1 Intercambiador de tubo y coraza

El tipo más común de intercambiador de calor en las aplicaciones industriales es el de tubos y coraza, el que se puede observar en la figura 5.1. Estos intercambiadores de calor contienen un gran número de tubos (a veces varios cientos) empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, en tanto que el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza. Es común la colocación de *desviadores* en la coraza para forzar al fluido a moverse en dirección transversal a dicha coraza con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espaciamiento uniforme entre los tubos.

Sin embargo plantea Cengel (2007) que pesar de su extendido uso, no son adecuados para utilizarse en automóviles y aviones debido a su peso y tamaño relativamente grandes. Nótese que en un intercambiador de este tipo los tubos se abren hacia ciertas zonas grandes de flujo, llamadas *cabezales*, que se encuentran en ambos extremos del casco, en donde el fluido del lado de los tubos se acumula antes de entrar y salir de ellos.



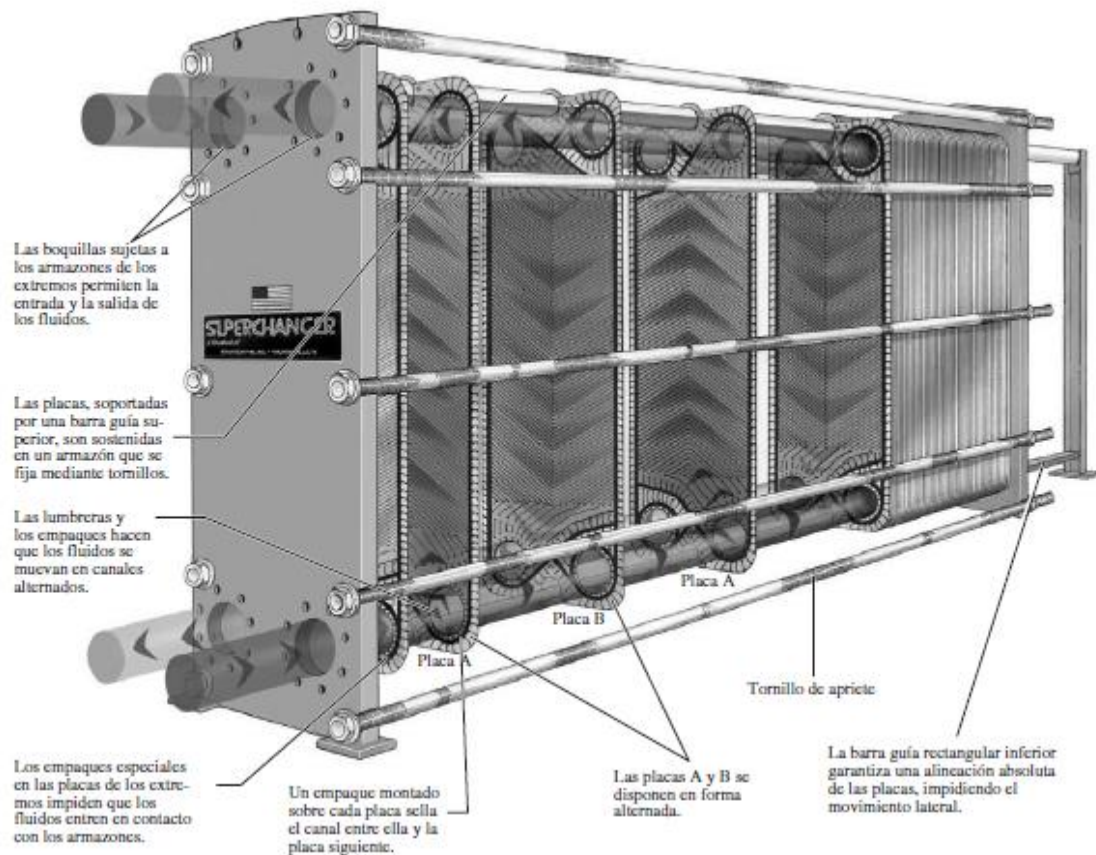
**Figura 5.1** Diagrama de las partes de un intercambiador de calor de tubo y coraza

**Fuente:** Cengel (2007)

### 5.2.2 Intercambiador de Placas

Un tipo innovador de intercambiador de calor que ha encontrado un amplio uso es el de placas y armazón (o sólo de placas), el cual consta de una serie de placas con pasos corrugados y aplastados tal como se muestra en la figura 5.2. Los fluidos caliente y frío

fluyen en pasos alternados, de este modo cada corriente de fluido frío queda rodeada por dos corrientes de fluido caliente, lo que da por resultado una transferencia muy eficaz de calor. Asimismo, este tipo de intercambiadores pueden crecer al aumentar la demanda de transferencia de calor sencillamente montando más placas. Resultan muy apropiados para aplicaciones de intercambio de calor de líquido hacia líquido, siempre que las corrientes de los fluidos caliente y frío se encuentren más o menos a la misma presión.



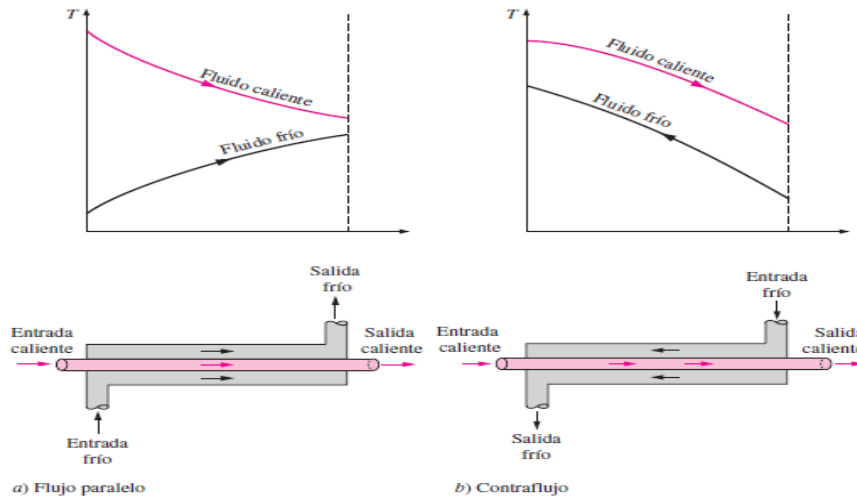
**Figura 5.2** Diagrama de las partes de un intercambiador de placas

**Fuente:** Cengel (2007)

### 5.2.3 Intercambiador de calor de tubo doble

El tipo más simple de intercambiador de calor consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes, como se muestra en la figura 5.3, llamado intercambiador de calor de tubo doble, donde en uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos. En un intercambiador de calor de tubo doble, son posibles dos tipos de disposición de flujo: en el flujo paralelo los dos fluidos, el frío y el caliente, entran en el intercambiador por el mismo extremo y se mueven en la

misma dirección. Por otra parte, en el contraflujo los fluidos entran en el intercambiador por los extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas.

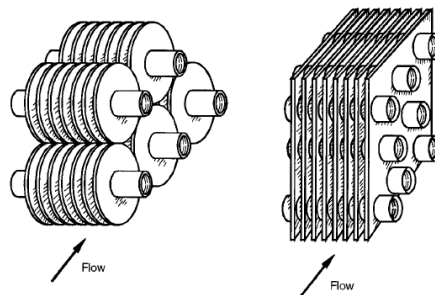


**Figura 5.3** Diagrama de las partes de un intercambiador de doble tubo

**Fuente:** Cengel (2007)

### 5.2.4 Intercambiador de calor Compacto

Los intercambiadores compactos tienen una amplia aplicación industrial, por lo general son intercambiadores de calor con densidades superficiales altas, del orden de  $700m^2/m^3$ . Se aclara que son intercambiadores de alta eficiencia y por lo general son diseñados para la transferencia de calor de gas-gas y gas-liquido. Además existen una amplia gama de intercambiadores de calor compactos dependiendo de su uso y finalmente los intercambiadores compactos se caracterizan por tener un flujo cruzado entre sus fluidos de trabajo, para mejor visualización se pueden observar en las figura 5.4.



**Figura 5.4** Tipos de aletas en intercambiadores de calor compactos

**Fuente:** Cengel (2007)



### 5.3 Características de los intercambiadores de calor

Para lograr una mejor transferencia de calor entre dos fluidos de manera indirecta, es necesario seleccionar el tipo correcto de intercambiador de calor, para ello es necesario tener un conocimiento general de las aplicaciones que pueden tener los diferentes intercambiadores de calor en la industria y además un conocimiento previo de las características fisicoquímicas de los fluidos de trabajo.

A continuación se muestran las tablas del 5.1-5.4 que resumen en su contenido las características generales de los intercambiadores de calor.

**Tabla 5.1** Características de un intercambiador de calor compacto.

Tipo de Intercambiador de Calor	Características Generales
Intercambiador de Calor compacto	Generalmente son diseñados con superficies extendidas para aumentar la transferencia de calor.
	Aplicación en condensadores y evaporadores de aire acondicionado, radiadores de motores de combustión interna y son aplicados en la industria geotérmica.
	Son utilizados para el intercambio de calor entre sistemas gas-gas y liquido-gas, óptimos para el intercambio de calor entre aire-agua.
	No hay problema en la contaminación entre los fluidos de trabajo.
	Problema con la remoción de incrustaciones debido a sus diámetros hidráulicos muy pequeños.
	Tienen una alta área de transferencia de calor por unidad de volumen, alrededor de $700m^2/m^3$ y tienen un alta efectividad arriba del 80%.

**Fuente:** Thulukkanam (2013)

**Elaboración propia**

**Tabla 5.2** Características de un intercambiador de calor de tubo y coraza.

Tipo de Intercambiador de Calor	Características Generales
<b>Intercambiador de Tubo y Coraza</b>	Intercambiadores de mediana efectividad alrededor del 40% -65%
	Intercambiadores de calor pesado y grande y difícil de construir.
	Ampliamente utilizados en enfriamiento de aceites, condensadores superficiales, calentadores de agua de alimentación, etc.
	Facilidad de remoción de incrustaciones por métodos mecánicos del lado interno de los tubos y fáciles de reparar.
	Generalmente se utilizan para la transferencia de calor líquido-líquido, líquido-fase y poco común para líquido-gas
	Temperaturas de operación oscilan entre 20-500°C y funcionan hasta una presión de 600bar =592,154 atm.

**Fuente:** Thulukkanam (2013)

**Elaboración propia**

**Tabla 5.3** Características de un intercambiador de calor de doble tubo.

Tipo de Intercambiador de Calor	Características Generales
<b>Intercambiador de calor de doble tubo</b>	Facilidad de remoción de incrustaciones por métodos mecánicos del lado interno de los tubos.
	Dificultad de remoción de los materiales incrustados del lado del anulo.
	Poco práctico debido a la baja superficie para la transferencia de calor.
	Requiere una baja caída de presión del lado del anulo.
	Son aplicables para el intercambio de calor de líquido-líquido.
	Temperaturas de operación oscilan entre 100-600°C

**Fuente:** Thulukkanam (2013)

**Elaboración propia**

**Tabla 5.4** Características de un intercambiador de placas

Tipo de Intercambiador de Calor	Características Generales
<b>Intercambiador de Placas</b>	Límites de rendimiento estándar: 25atm, 160°C, 3600 m <sup>3</sup> /h.
	Alta efectividad de transferencia de calor 90% máximo.
	Fácil mantenimiento por incrustaciones.
	La temperatura máxima de funcionamiento y la presión están limitadas por los materiales de junta. Las juntas no pueden manejar fluidos corrosivos o agresivos.
	No se pueden manejar partículas que sean más largas que 0.5mm.
	Las juntas aumentan el riesgo de fugas.

**Fuente:** Thulukkanam (2013)

### Elaboración propia

Una de las aplicaciones de los intercambiadores de calor que ocupen fluido geotérmico como fuente térmica es el adaptarlos a secadores de café existentes en el país; Para la utilización de un intercambiador compacto se requiere una bomba para extraer el fluido geotérmico de un pozo de baja entalpia, luego hace su recorrido por el intercambiador de calor, y por último el fluido geotérmico se reinyecta en un pozo, el aire se mueve por medio de un ventilador que está direccionado hacia el centro del intercambiador de calor para lograr la transferencia deseada. Por último, el aire caliente se introduce en un secador de café pudiendo ser cualquiera de los mencionados anteriormente. Para los intercambiadores de calor de tubo y coraza se cambia el ventilador por un compresor para impulsar el aire a través del banco de tubos que contiene la coraza del intercambiador de calor.

#### 5.4 Ecuaciones de diseño: Intercambiador tubo y coraza.

Todas las ecuaciones que se muestran a continuación han sido obtenidas del autor Incropera (2007). Los parámetros termo-físicos que se requieren en los cálculos como: número de Prandtl, densidad, viscosidad dinámica, y calor específico son obtenidos a partir de tablas (ver Anexo D).

Ecuaciones de la razón de transferencia de calor total.

$$q = m * cp * (T_o - T_i) \quad \text{Ec 5.1}$$

$$q = U * LMTD * A * f \quad \text{Ec 5.2}$$

El factor de corrección f se estima a partir del grafico (ver Anexo E). Dichos gráficos son exclusivos para cada tipo de arreglo de intercambiador de calor. Para el presente caso se utiliza el grafico de un fluido mezclado y el otro sin mezclar.

Ecuaciones del cálculo de LMTD.

$$LMTD = \frac{(T_{ho}-T_{co})-(T_{hi}-T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{ho}-T_{co}}{T_{hi}-T_{ci}}\right)} \quad \text{Ec. 5.3}$$

En el lado del agua se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad para flujo de fluidos dentro de un banco de tubos.

$$V_m = \frac{ma}{\rho * A * ntf * ntf} \quad \text{Ec 5.4}$$

Ecuación para el cálculo del número de Reynolds dentro de tubos cilíndricos.

$$Re_w = \frac{\rho * V_m * d}{\mu} \quad \text{Ec 5.5}$$

Ecuación para el cálculo de número de Nusselt para flujo dentro de tubos cilíndricos.

$$Nu_w = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{-2/3} \quad \text{Ec 5.6}$$

Ecuación para el cálculo de la conectividad.

$$h_w = \frac{Nu * k}{d} \quad \text{Ec 5.7}$$

En el lado del aire se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para el cálculo del ancho del intercambiador de calor.

$$w = st * (ntf + 2) \quad \text{Ec 5.8}$$

Ecuaciones de relación entre el tamaño de baffle y el ancho del intercambiador, recomendada a partir de la experiencia de diseño.

$$bf = 0.75 * w \quad \text{Ec 5.9}$$

Ecuaciones para el cálculo del área de transferencia de calor.

$$A = w * bf \quad \text{Ec 5.10}$$

Ecuaciones de la razón de transferencia de calor total.

$$V_{\infty} = \frac{m}{\rho * A} \quad \text{Ec 5.11}$$

Ecuaciones de la relación geométrica distancia diagonal entre tubos.

$$Sd = \sqrt{Sl^2 + \left(\frac{St}{2}\right)^2} \quad \text{Ec 5.12}$$

Ecuaciones del cálculo de la velocidad máxima si no hubiera tubos en el intercambiador.

$$V_{max} = \frac{S_t * V_{oo}}{S_d - d} \quad \text{Ec 5.13}$$

$$V_{max} = \frac{S_t * V_{oo}}{S_t - d} \quad \text{Ec 5.14}$$

La ecuación 5.13 se utiliza cuando la relación entre la distancia diagonal de tubos es menor que el promedio de la distancia transversal de los tubos sumada con el diámetro. Caso contrario se utiliza la ecuación 5.14.

Ecuación para el cálculo del número de Reynolds.

$$Re_a = \frac{\rho * V_{max} * d}{\mu} \quad \text{Ec 5.15}$$

Ecuaciones para el cálculo de número de Nusselt para flujo dentro de tubos cilíndricos.

$$Nu_a = c2 * c1 * 1.13 * Re^m * Pr^{1/3} \quad \text{Ec 5.16}$$

$$Nu_a = c2 * c1 * Re^m * Pr^{0.36} \quad \text{Ec 5.17}$$

Las ecuaciones 5.16 y 5.17 se escogen dependiendo del número de Reynolds y numero de Prandtl, requieren los parámetros c1 y m que se encuentran en tablas para cada relación, los parámetros c2 tablas (ver Anexo E) para cada ecuación son encontrados en otra tabla que depende de la cantidad de filas que tiene el arreglo.

Ecuación para el cálculo de coeficiente de transferencia de calor conectiva del fluido frío.

$$h_a = \frac{Nu * k}{d} \quad \text{Ec 5.18}$$

Ecuación para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total. Se desprecia la resistencia a partir del ensuciamiento dentro de los tubos.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{hw} + \frac{1}{ha} \quad \text{Ec 5.19}$$

Ecuaciones para el cálculo del área de transferencia de calor.

$$m = \frac{L}{bf} - 1 \quad \text{Ec 5.20}$$

### 5.5 Ecuaciones de diseño: Intercambiador compacto.

La metodología de diseño de un intercambiador de calor compacto o radiador fue tomada del trabajo de Romero y Carranza (2007) los cuales se basaron a su vez en la metodología más referenciada, la cual pertenece a los autores Kays and London. También se tomaron todas las ecuaciones de diseño del documento.

Ecuación para el cálculo del área frontal del intercambiador compacto del lado del agua.

$$A_{fr2} = l_w * l_h \quad \text{Ec 5.21}$$

Ecuación para el cálculo de la relación geométrica del flujo mínimo sobre área frontal

$$\sigma = ((\pi/4) * (Di^2))/xt * xl \quad \text{Ec 5.22}$$

Ecuación para el cálculo del número de tubos que puede tener el intercambiador de calor.

$$Nt = (l_h/xt) * ((l_w/xt) - 1)/2 + \left(\frac{l_h}{xt}\right) - 1 * ((l_w/xl) - 1)/2 \quad \text{Ec 5.23}$$

Ecuación para el cálculo del área total de transferencia de calor por el lado del agua.

$$A_2 = \pi * Di * l_a * Nt \quad \text{Ec 5.24}$$

Ecuación para el cálculo del área de flujo mínimo por el lado del agua.  $A_{fr}$

$$A_{02} = \left(\frac{\pi}{4}\right) * (Di^2) * Nt \quad \text{Ec 5.25}$$

Ecuación para el cálculo del área superficial del lado del agua

$$\alpha = A_2/l_h l_w l_a \quad \text{Ec 5.26}$$

Ecuación para calcular el área total de transferencia del lado del aire

$$A_1 = \pi * do * l_a * Nt + 2 * ((l_w * l_h - (Nt * \pi * (do)^2)/4) \quad \text{Ec 5.27}$$

Ecuación para el cálculo de la efectividad.

$$\varepsilon = (T_{co} - T_{ci})/(T_{hi} - T_{ci}) \quad \text{Ec 5.28}$$

Ecuación para el cálculo de temperatura de salida del agua.

$$T_{ho} = T_{hi} - \varepsilon \left(\frac{C_{min}}{C_h}\right) * (T_{hi} - T_{ci}) \quad \text{Ec 5.29}$$

Ecuación para el cálculo del número de Reynolds en el lado del aire.

$$Rea = (m_a * D_i) / (\mu_w * A_o) \quad \text{Ec 5.30}$$

Ecuación para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo del aire.

$$h_a = j * G_a * cp_a * Pr^{-2/3} \quad \text{Ec 5.31}$$

El coeficiente j es el factor de Colburn, es obtenido a partir de la tabla (ver Anexo F).

Ecuación para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total. Se desprecia la resistencia a partir del ensuciamiento dentro de los tubos.

$$\frac{1}{U} = \frac{\alpha_a}{\alpha_w * h_w} + \frac{1}{n * h_a} \quad \text{Ec 5.32}$$

Ecuación para el cálculo del área de flujo mínimo por el lado del agua.

$$NTU = \frac{A_1 * U}{m * cp} \quad \text{Ec 5.33}$$

Ecuación para el cálculo del área superficial del lado del agua

$$C = C_{min} / C_{max} \quad \text{Ec 5.34}$$

Ecuación para el cálculo de la eficiencia real.

$$ef = 1 - \exp\left(\left(\frac{ntu^{0.22}}{c} * (\exp(-c * ntu^{0.78}) - 1)\right)\right) \quad \text{Ec 5.35}$$

Ecuaciones de la razón de transferencia de calor total.

$$q = m * cp * ef * (T_o - T_i) \quad \text{Ec 5.37}$$

**Tabla 5.5** Simbología de las ecuaciones de diseño del intercambiador compacto.

Simbología		
Símbolo	Definición	Unidades
Afr	Área frontal del intercambiador de calor	$m^2$
lw	Longitud del lado del agua	$m$
lt	Altura del intercambiador de calor	$m$
$\sigma$	Razón de flujo mínimo sobre área frontal	<i>adimensional</i>
Nt	Numero de tubos	<i>adimensional</i>
xt	Distancia transversal entre los centro de dos tubos	$m$
xl	Distancia longitudinal entre los centro de dos tubos	$m$
Ao	Área de flujo mínimo	$m^2$
$\alpha$	Área superficial	$m^2/m^3$
A	Área total de transferencia	$m^2$
$\varepsilon$	Efectividad	<i>adimensional</i>
Tho	Temperatura de salida del fluido geotérmico	<i>Kelvin (K)</i>
Thi	Temperatura de entrada del fluido geotérmico	<i>Kelvin (K)</i>
Tco	Temperatura de salida del aire	<i>Kelvin (K)</i>
Tci	Temperatura de entrada del aire	<i>Kelvin (K)</i>
Cp	Calor específico	$J/(kg * K)$
Cmin	Razón de flujo de calor por masa menor	$J/(s * K)$
Cmax	Razón de flujo de calor por masa mayor	$J/(s * K)$
Re	Numero de Reynolds	<i>adimensional</i>
h	Convectividad térmica	$W/(m * K)$
G	Razón de flujo másico	$Kg/(s*m^2)$
$m_w$	Flujo másico del fluido geotérmico	$Kg/s$
$m_a$	Flujo másico del aire	$Kg/s$
f	Factor de corrección f	<i>adimensional</i>
LMTD	Temperatura logarítmica media	<i>adimensional</i>
j	Facto de Colburn	<i>adimensional</i>
U	Coeficiente de transferencia de calor total	$\frac{W}{m^2K}$
NTU	Número de unidades de transferencia	<i>adimensional</i>
ef	Efectividad	<i>adimensional</i>
q	Transferencia de calor	$W$

### 5.6 Flujogramas, códigos y graficas

El flujograma específico es la base de la metodología de diseño de cada intercambiador de calor, para desarrollar programa en MATLAB®, a partir de su código (ver Anexo G.1), que facilite los cálculos de proceso iterativos, hasta encontrar el diseño óptimo de cada

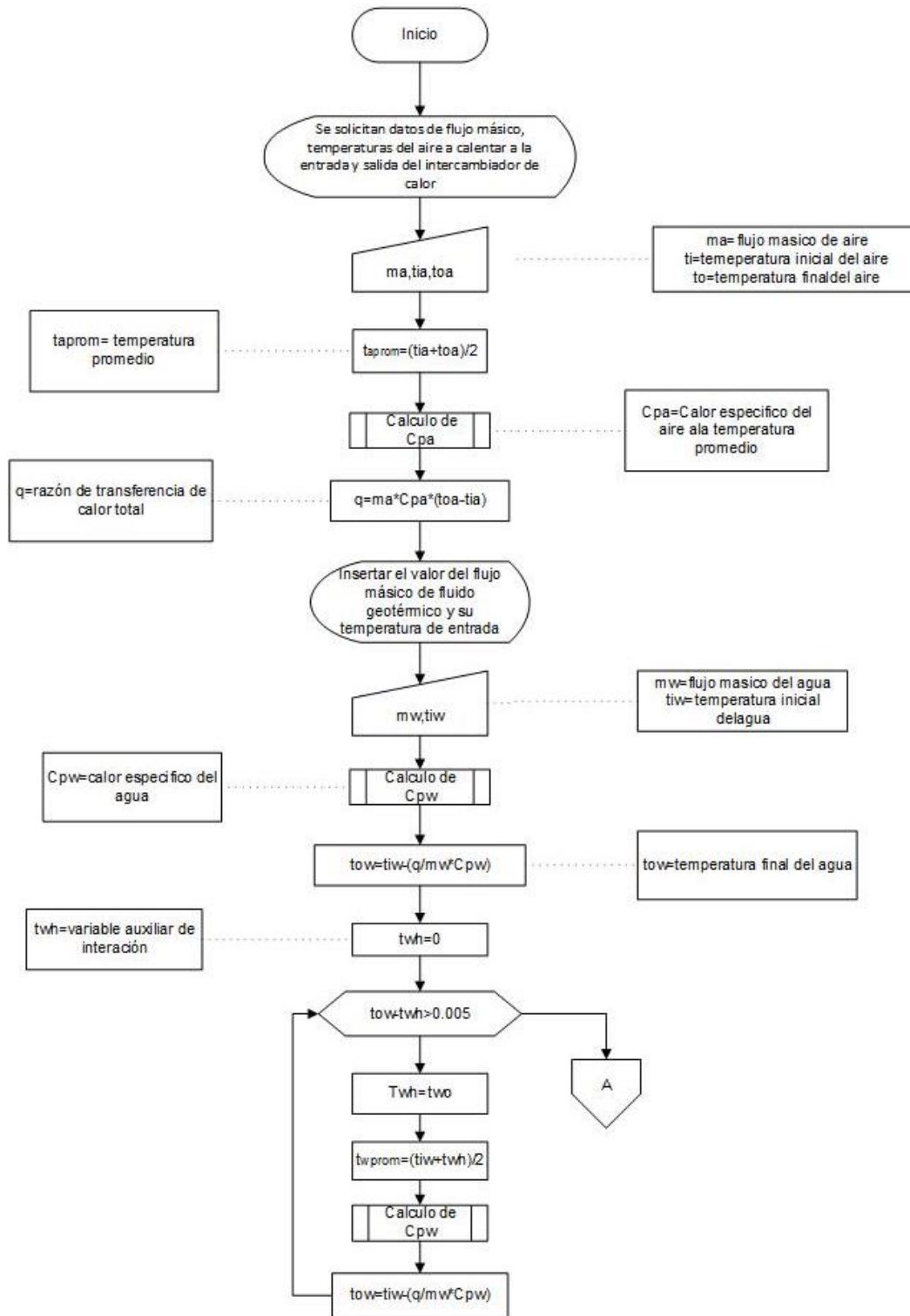


intercambiador de calor, en función de los parámetros fisicoquímicos de entrada que tenga cualquier fluido geotérmico y condiciones de aire en un lugar determinado. MATLAB® tiene a su disposición una licencia gratuita por 30 días que fue utilizada en el desarrollo de los programas.

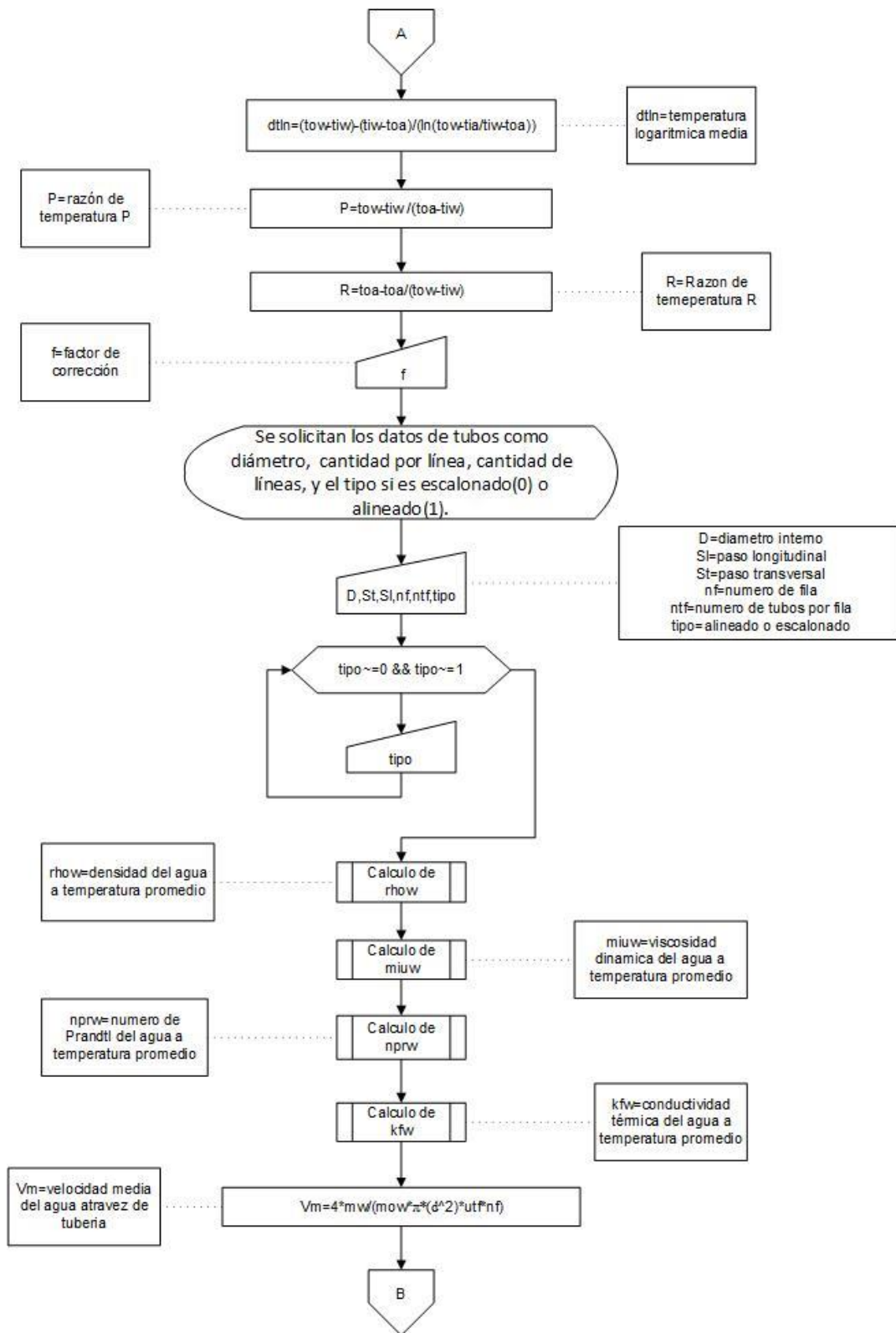
El código en MATLAB® es desarrollado a partir de los flujograma de diseño para cada uno de los intercambiadores. El programa generado a partir del código del intercambiador de calor de tubo y carcasa está diseñado para calcular las dimensiones del intercambiador, a partir de datos fisicoquímicos de los fluidos. El programa generado a partir del código del intercambiador de calor compacto calcula, partiendo del dimensionamiento geométrico, la razón de transferencia de calor en función del flujo másico del fluido geotérmico (ver Anexo G.2).

Los programas tienen la capacidad de generar gráficos que relacionen parámetros de dimensionamiento con respecto a las condiciones que un fluido pueda variar, por ejemplo: flujo másico del fluido geotérmico, diámetros de tubos, etc.

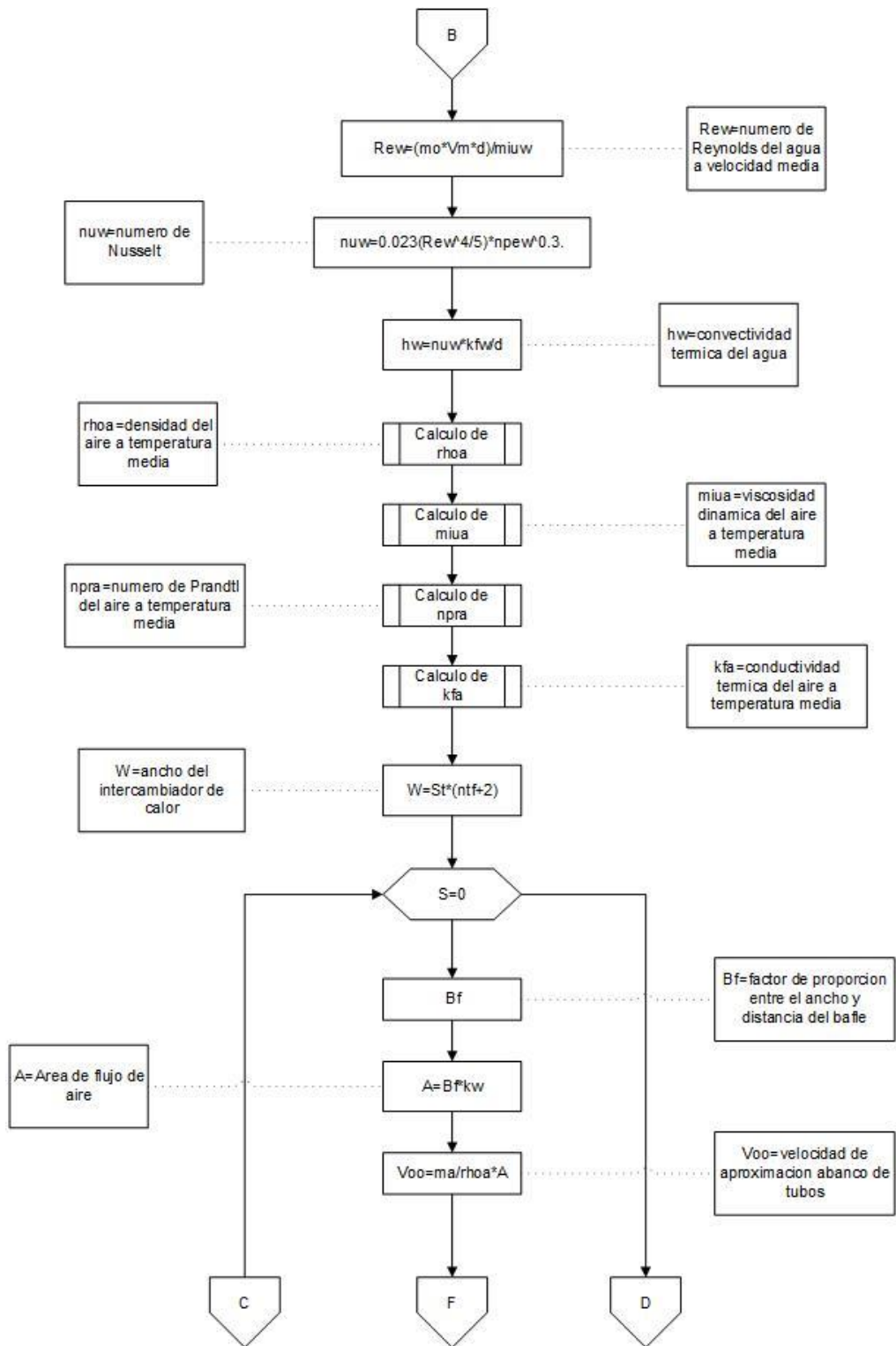
### 5.6.1 Flujograma intercambiador de tubo y coraza



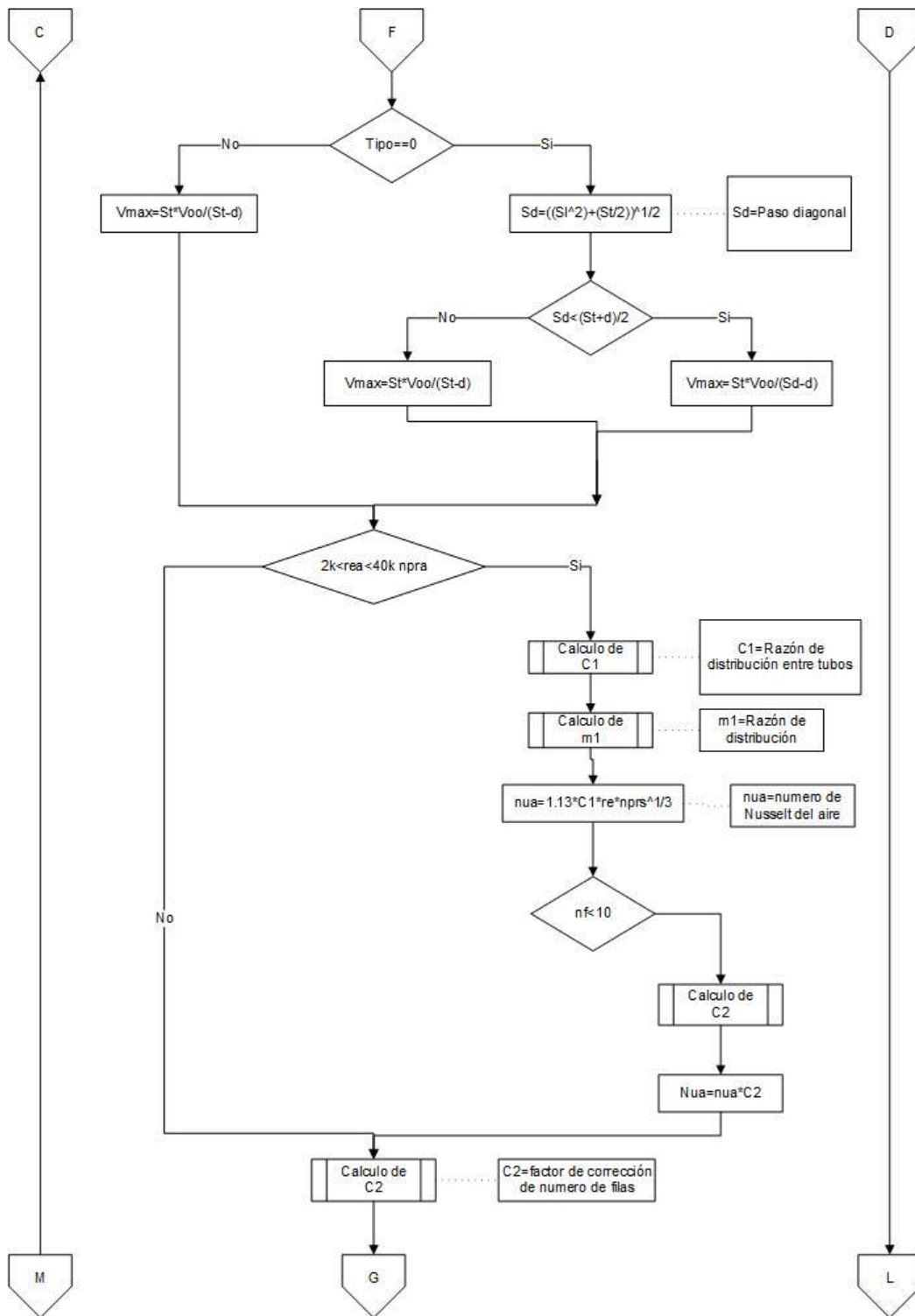
**Figura 5.5a** En este flujograma del intercambiador de calor tubo y coraza.



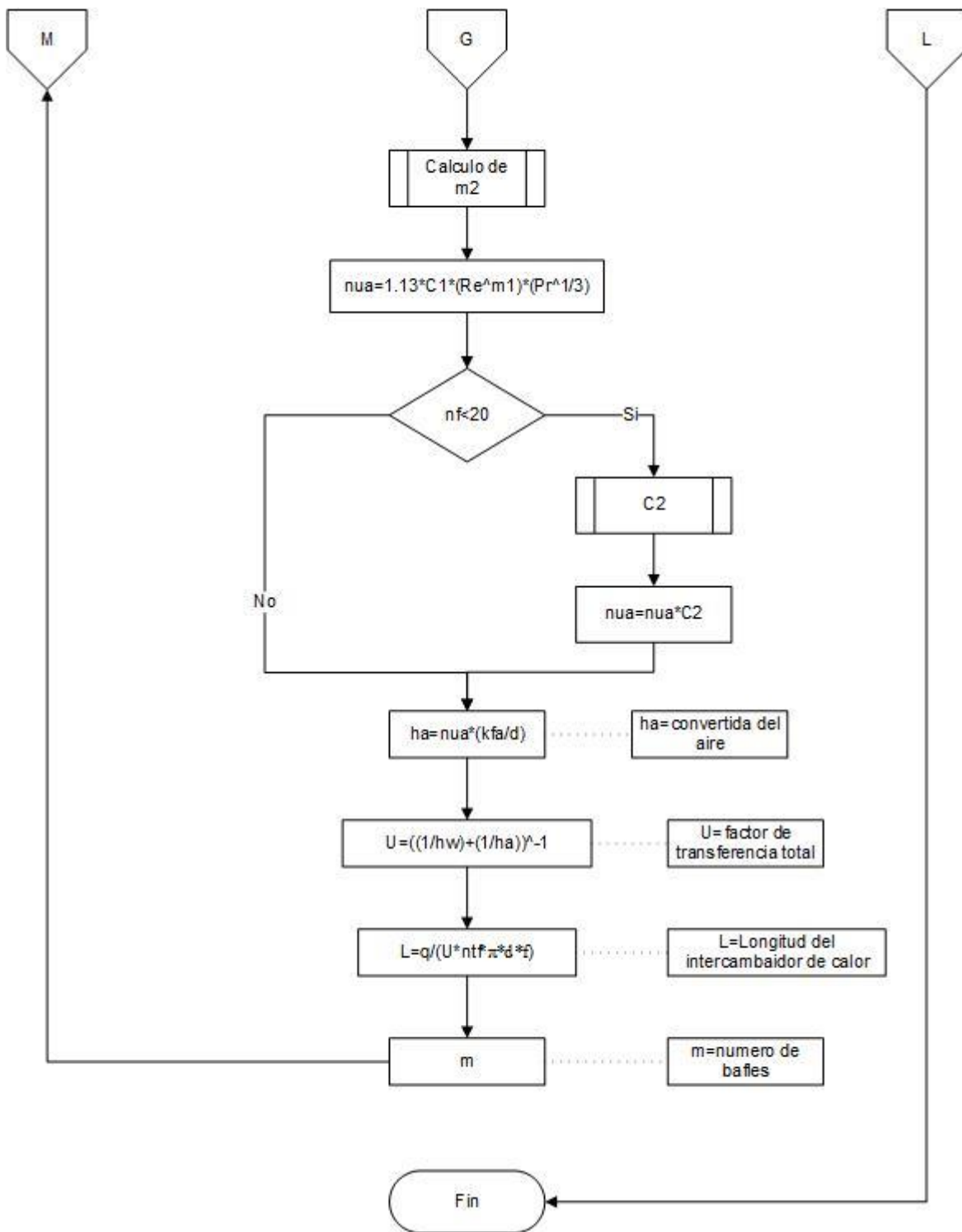
**Figura 5.6b** En este flujograma del intercambiador de calor tubo y coraza.



**Figura 5.7c** En este flujograma del intercambiador de calor tubo y coraza.



**Figura 5.8d** En este flujograma del intercambiador de calor tubo y coraza.



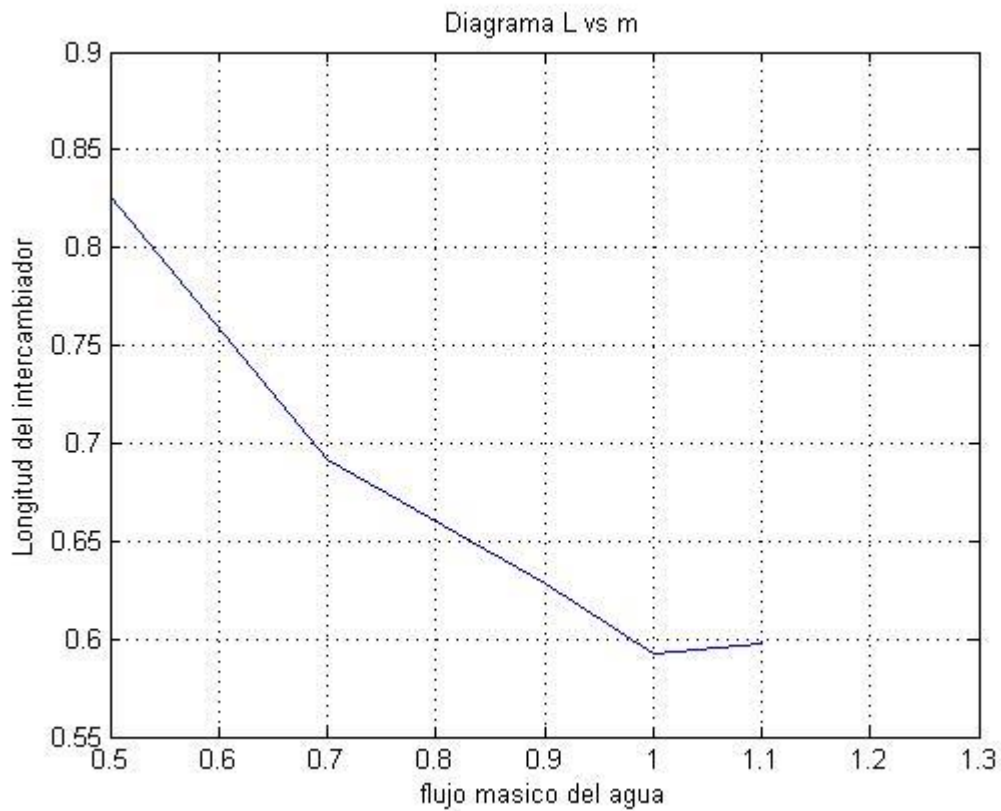
**Figura 5.9e** En este flujograma del intercambiador de calor tubo y coraza.

### 5.6.2 Gráficas y tablas de resultados: Intercambiador Tubo y Coraza.

Tabla 5.6 Datos del flujo másico del fluido geotérmico vs Longitud del intercambiador.

Flujo Másico (kg/s)	Longitud (m)
0.5	0.8264
0.7	0.6919
0.9	0.6280
1.0	0.5923
1.1	0.5980

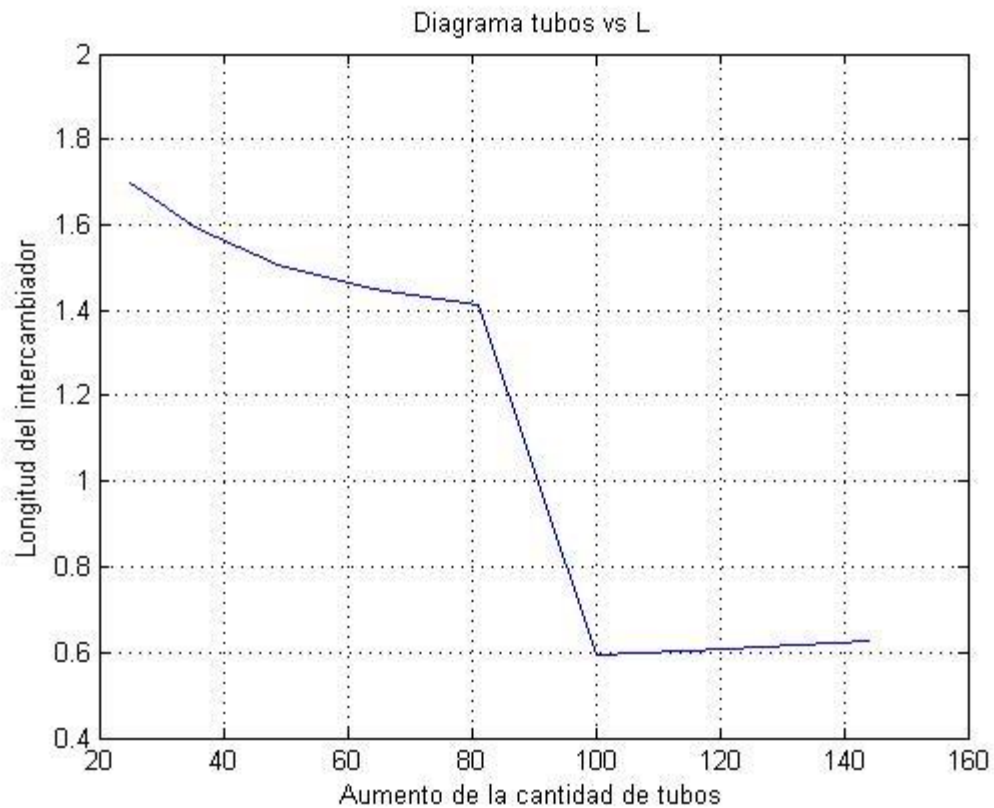
Gráfico 5.1 Flujo másico vs Longitud en el intercambiador de tubo y coraza



**Tabla 5.7** Datos de variación de la cantidad de tubos vs Longitud del intercambiador.

Numero de tubos	Longitud (m)
25	1.7000
36	1.5897
49	1.5059
64	1.4524
81	1.4109
100	0.5923
121	0.6090
144	0.6255

**Gráfico 5.2** Cantidad de tubos vs Longitud en el intercambiador de tubo y coraza.





### 5.6.3 Flujograma Intercambiador compacto

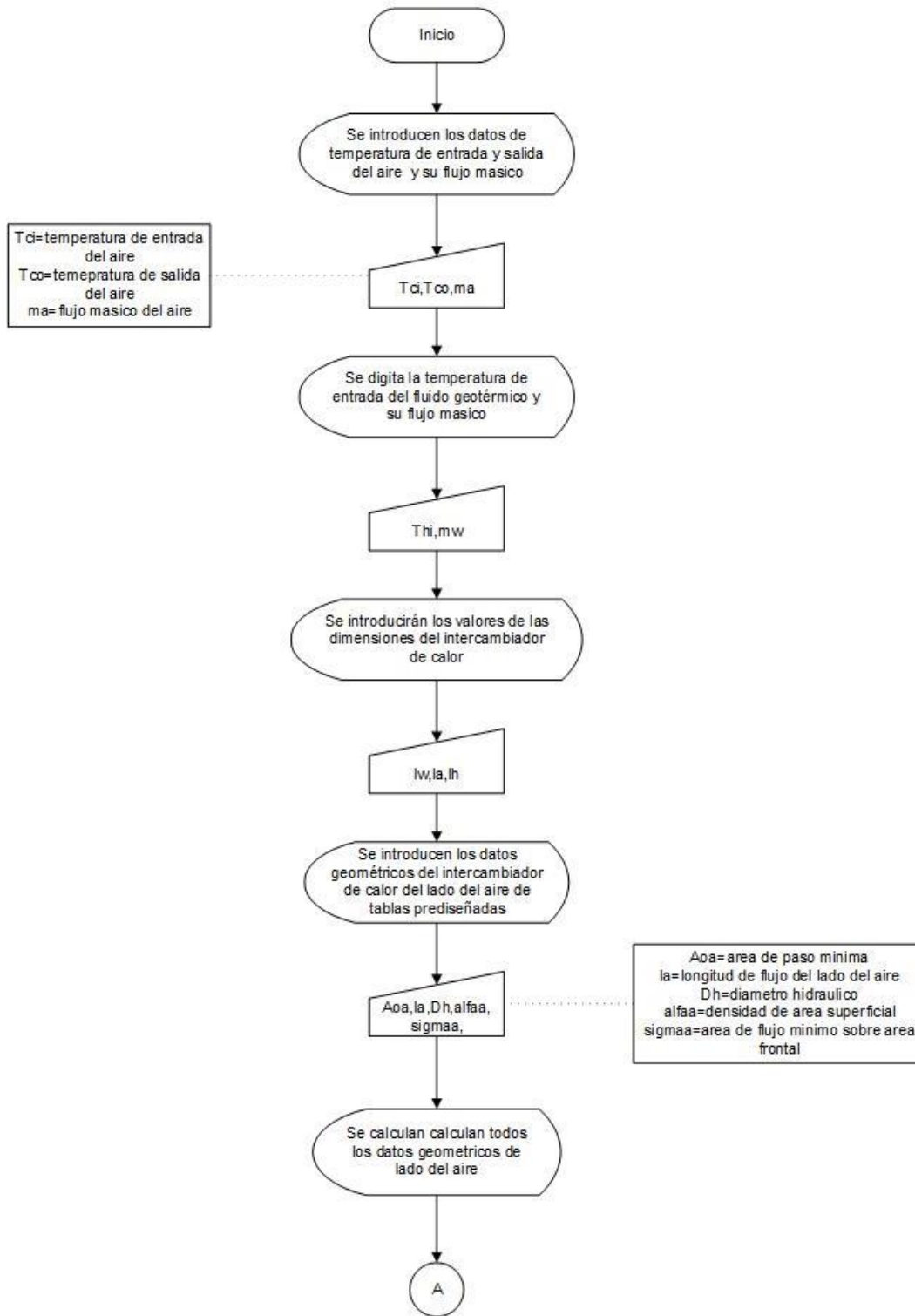


Figura 5.10a Flujograma del intercambiador de calor compacto.

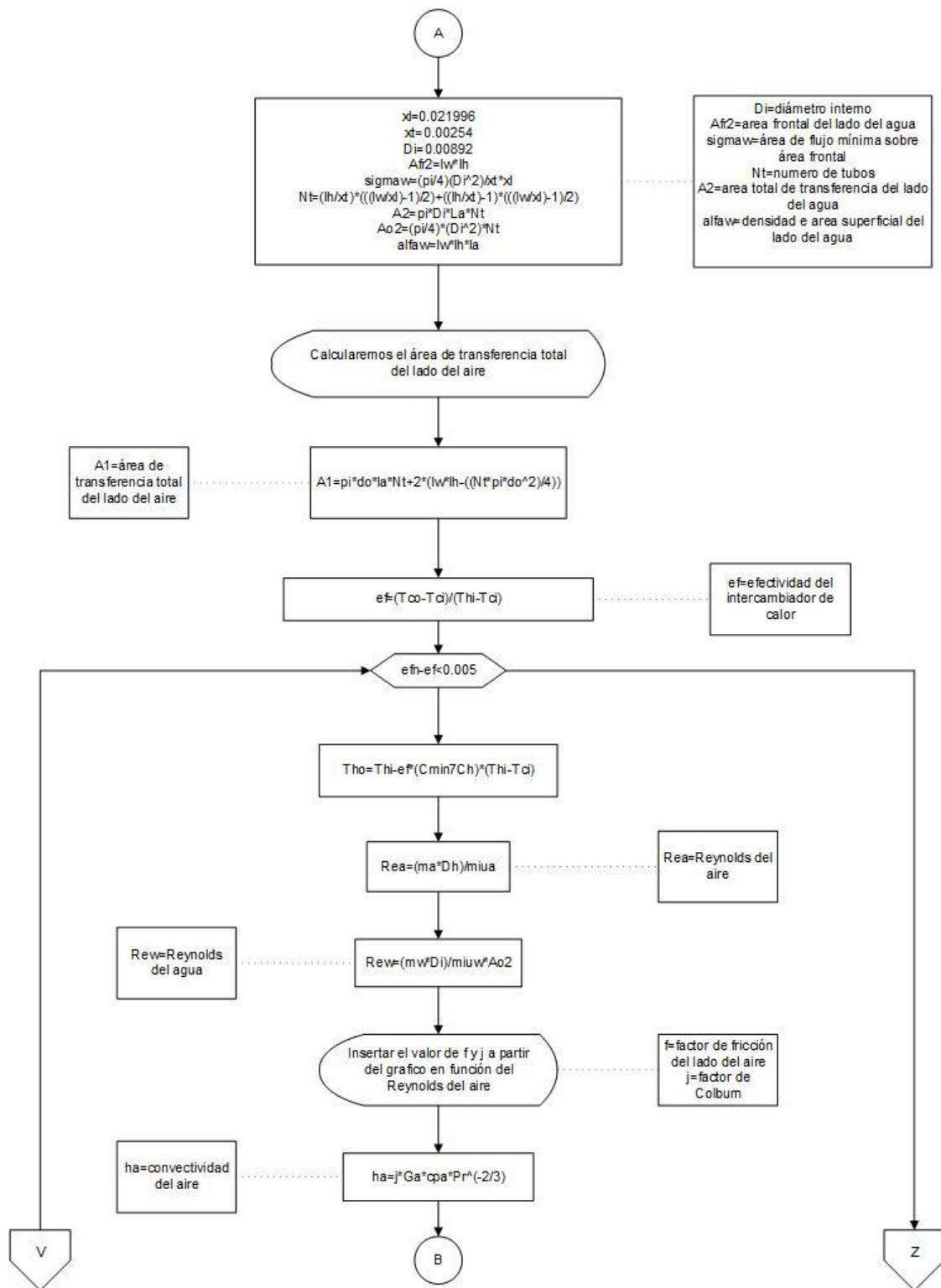
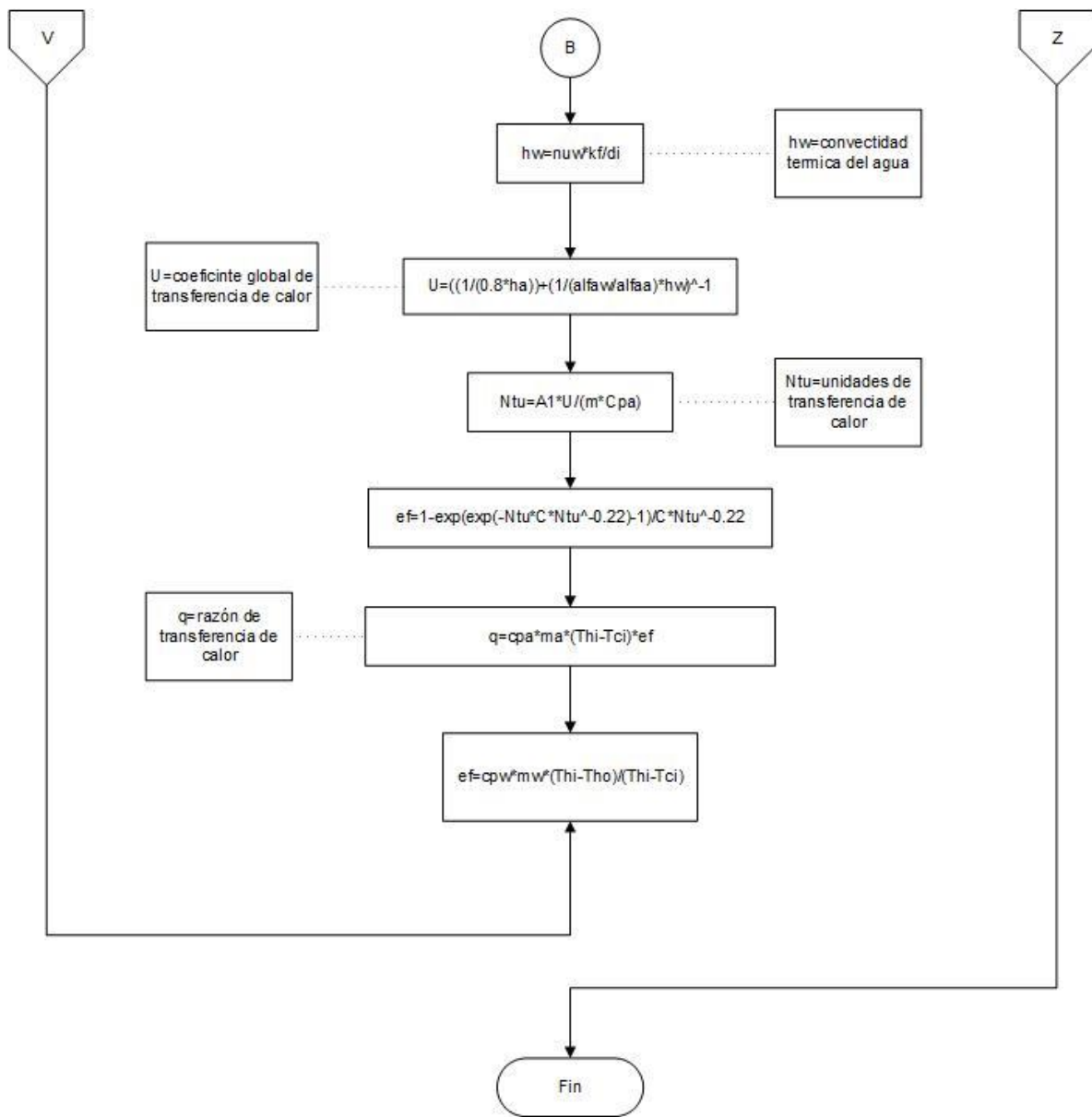


Figura 5.11b Flujograma del intercambiador de calor compacto.



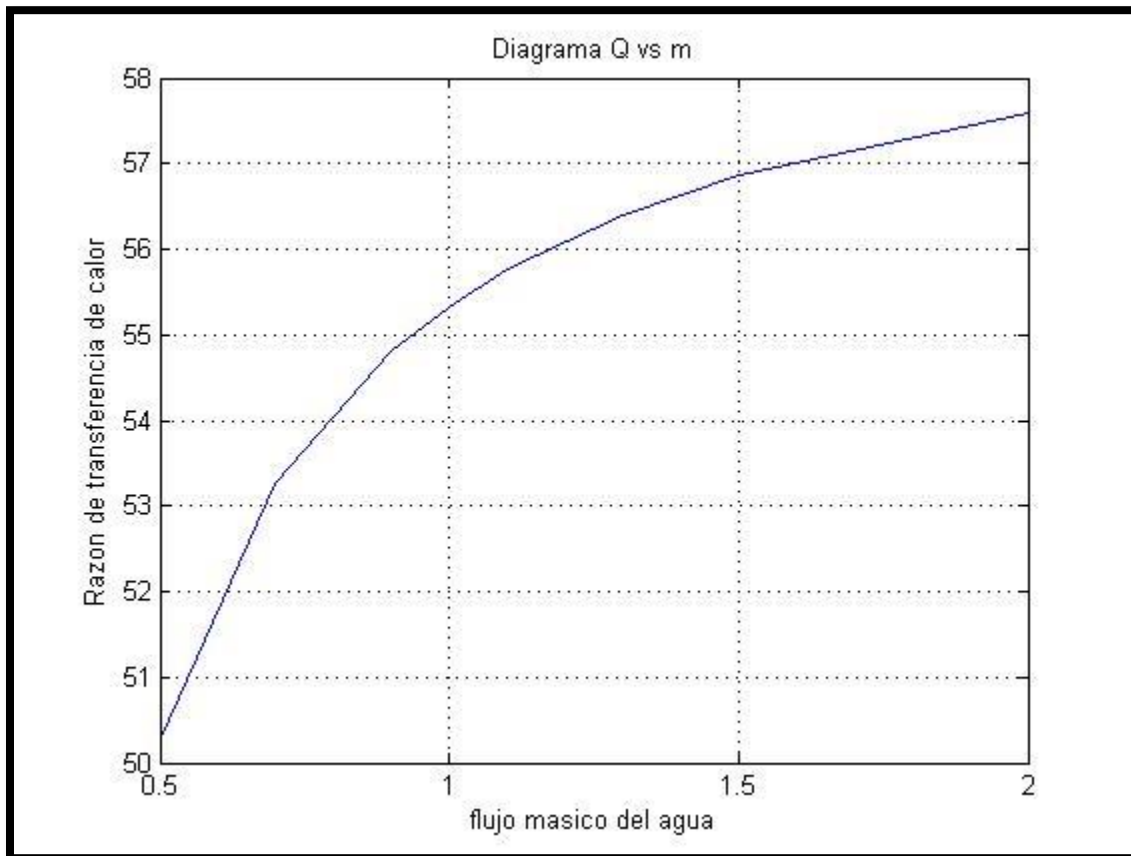
**Figura 5.12c** Flujograma del intercambiador de calor compacto.

### 5.6.4 Gráficas y tablas de resultados: intercambiador compacto.

**Tabla 5.8** Datos de flujo másico del fluido geotérmico vs razón transferencia de calor.

Flujo másico (kg/s)	Razón de transferencia de calor (kW)
0.5	50.2731
0.7	53.2731
0.9	54.7990
1.0	55.3333
1.1	55.7613
1.3	56.4047
1.5	56.8632

**Gráfico 5.3** Flujo másico vs Razón de transferencia de calor.



## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan los resultados de los programas desarrollados en MATLAB®, a partir de los datos de entrada siguientes:

**Tabla 6.1** Datos de entrada a los intercambiadores de calor, en la sección del aire.

Dato	Valor	Descripción del Origen
Flujo másico (kg/s)	1.19	Es obtenido de la tabla 4.1. Debido a que es un parámetro requerido para el funcionamiento normal del secado vertical.
Temperatura de entrada (°C)	27	Es obtenido a partir de la temperatura media de Ahuachapán, según SNET.
Temperatura de salida (°C)	68	Es obtenido de la tabla 4.1. Debido a que es un parámetro requerido para el funcionamiento normal del secado vertical.

**Tabla 6.2** Datos de entrada a los intercambiadores de calor, en la sección agua.

Dato	Valor	Descripción del Origen
Flujo másico (kg/s)	1	Dato sugerido en base a la experiencia de los cálculos.
Temperatura de entrada (°C)	90	Es tomado a partir de los rangos de aplicaciones de fluido geotérmico de baja entalpia. Tiene como ventaja de ser parte de fluido líquido dominante.

Todos los datos que fueron referenciados en las tablas 6.1-6.2, y utilizados en el programa, son sujetos a variación de los requerimientos que el usuario desee o crea conveniente.

**Tabla 6.3** Datos de salida del intercambiador de calor tubo y coraza.

Flujo másico del aire (kg/s):	1.19
Temperatura inicial del aire (°C)	27
Temperatura final del aire (°C)	68
Flujo másico del agua (kg/s)	1
Temperatura inicial del agua (°C)	90
Temperatura final del agua (°C)	78.31
La transferencia de calor es (kW)	49.15
El largo del intercambiador de calor (m)	0.6048
El número de mamparos son	1.32

**Tabla 6.4** Datos de salida del intercambiador de calor compacto.

Flujo másico del aire (kg/s)	1.19
Temperatura inicial del aire (°C)	27
Temperatura final del aire (°C)	68
Flujo másico del agua (kg/s)	1
Temperatura inicial del agua (°C)	90
Temperatura final del agua (°C)	74.33
La transferencia de calor es (kW)	55.33
El número de tubos es	27.3
La efectividad es	0.872

### **6.1 Análisis de resultados de intercambiador tubo y coraza**

En el intercambiador de calor de tubo y coraza el fluido caliente, en este caso el fluido geotérmico, se transporta dentro de los tubos; mientras que el fluido a calentar, en este caso el aire, recorre el lado externo de los tubos.

En el grafico 5.1 se muestra la variabilidad de la longitud del intercambiador de calor en función del flujo másico del fluido geotérmico. Se observa que cuando el fluido geotérmico tiene 0.5 kg/s de fluido másico, la longitud del intercambiador de calor es máxima con 0.825 m. Mientras que se alcanza un mínimo de longitud en el flujo de 1kg/s, que a su vez es el óptimo para el diseño del intercambiador, con los siguientes parámetros: 100 tubos alienados, 19mm de diámetro, paso transversal de 29mm, y paso longitudinal de 29mm (ver anexo I.1). Por último, el grafico 5.1 se limita a datos de flujo másico hasta un valor de 1.1, debido a que el factor de corrección  $f$  en los gráficos es limitado.

En el grafico 5.2 se muestra que el aumento en la cantidad de tubos en el intercambiador de calor, disminuye la longitud del mismo, hasta un punto mínimo de 100 tubos con una longitud de 0.6 m; pero si se siguen aumentando la cantidad de tubos, comenzara a aumentar la longitud del mismo. El grafico muestra una caída de longitud, en forma de curva, en los primeros 3 datos debido a que el aumento de tubos se genera mayor turbulencia dentro de los tubos. Cuando se aumenta la turbulencia afecta la energía que se utilizara en movilizar el aire dentro de la coraza, quiere decir, que habrá mayor gasto energético a partir del compresor a utilizar.

### **6.2 Análisis de resultados de intercambiador compacto**

A partir de los resultados mostrados en el grafico 5.3 se demuestra que al aumentar el caudal del fluido geotérmico, el cual aporta la energía al sistema, aumenta la razón de transferencia de calor al aire, dicha transferencia demuestra que a medida se aumente el caudal llegara un punto máximo constante, puesto que la posibilidad del aire de recibir

calor a las condiciones de temperatura se van reduciendo, a partir de las dimensiones estipuladas del intercambiador de calor las cuales son: longitud 540mm, altura 540mm, ancho 28.4mm. Las medidas fueron modificadas de manera que el intercambiador de calor pudiera ser útil mecánicamente (ver Anexo I.2).

A partir de los datos de las tablas 6.3 y 6.4, se observa que existe mejor transferencia de calor en el intercambiador de calor compacto con una razón de 55.33kW contra 49.15kW que tiene el intercambiador de calor de tubo y coraza. La razón de transferencia de calor se refleja en la menor temperatura con la que sale el fluido geotérmico del intercambiador de calor compacto de: 74.33°C, que es 4 grados menor que la del intercambiador de calor de tubo y coraza. Todo esto influye en el área de transferencia de calor, ya que se necesita menor área de transferencia de calor con el intercambiador compacto que el de tubo y coraza. Para igualar dicha transferencia se necesita aumentar el número de tubos, pero como se mencionó anteriormente el intercambiador de calor de tubo y coraza ya se encuentra en su óptimo con 100 tubos.

### **6.3 Análisis para el diseño sistema de secado de café**

Se demuestra que los intercambiadores de calor mencionados anteriormente, que utilizan fluido geotérmico de baja entalpia y aire, pueden suplir aire caliente a los requisitos térmicos que requiere el secador de café vertical. Los intercambiadores tienen longitudes pequeñas que pudieran llegar a ser adaptados en los secadores, de manera que se aproveche al máximo la disponibilidad de espacio, y una posible variación de los requerimientos del secador.

## 7. CONCLUSIONES

- 1) En El Salvador existe mayor presencia de fluido geotérmico de baja entalpia, que los de mediana y alta entalpia, siendo esta una oportunidad para el desarrollo de tecnologías que funcionen con este recurso.
- 2) Existen diferentes usos del fluido geotérmico de baja entalpia, uno de estos es para el secado de café. En El Salvador existe una industria grande de café, y su producción como procesamiento se encuentra cerca de zonas de actividad geotérmica.
- 3) Los principales problemas en tuberías e intercambiadores de calor son la corrosión e incrustaciones, estos problemas se incrementan por el uso de fluido geotérmico de baja entalpia.
- 4) Existen métodos preventivos para disminuir estos impactos, en el caso de incrustación de calcita se debe evitar la aireación del fluido geotérmico, para que el dióxido de carbono en el fluido no precipite; mientras que en el caso de la incrustación de sílice se evita mediante el enfriamiento mínimo del fluido geotérmico en el intercambiador de calor, a niveles menores del punto de la temperatura de sobresaturación.
- 5) La corrosión se disminuye seleccionando cobre como material de diseño para los intercambiadores de calor.
- 6) Se concluye que los intercambiadores de calor: tubo y carcaza, y compacto; pueden alcanzar la temperatura requerida en el secador de café vertical, a partir de las condiciones de entrada establecidas previamente, de manera que las calderas, y hornos actuales que trabajan con combustibles fósiles, pueden ser sustituidos por intercambiadores de calor que utilicen un recurso renovable.



## **8. RECOMENDACIONES**

- 1) Las incrustaciones a partir del uso de fluido geotérmico de baja entalpia pueden ser prevenidas, y en caso que exista presencia de incrustaciones en componentes como las tuberías, y los intercambiadores de calor, deben ser removidos mecánicamente.
- 2) Para mejor control de incrustaciones y corrosión se contraten empresas que se especializan en este tipo de problemas.
- 3) Realizar un estudio previo de las condiciones fisicoquímicas del fluido geotérmico a utilizar.
- 4) Los intercambiadores diseñados pueden ser adaptados para el secado de otro producto alimenticio.
- 5) Los programas pueden recibir otro tipo de parámetros fisicoquímicos del fluido geotérmico y entrada del aire, modificando los dimensionamientos del intercambiador de calor a diseñar.
- 6) Se recomienda que se elija el intercambiador de calor adecuado, a partir de las condiciones de uso.
- 7) Para el desarrollo de sistemas de secado, es útil el uso de fluido geotérmico de baja entalpia, así como también el uso de bombas de calor. De esta manera se evitara los problemas de incrustaciones asociados al uso de fluido geotérmico de baja entalpia.
- 8) Para transferencia de calor con aire se recomienda utilizar intercambiadores de calor compactos, porque tienen la ventaja de tener mejor razón de transferencia de calor, y tienen dimensiones físicas pequeñas en comparación a uno de tubo y coraza.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, H., y López, K. (1995). *Caracterización de Equipos de Secado de Café Existentes en Beneficios de El Salvador*. Trabajo de Graduación para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., y Castro, M. (2009). *Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables* (1.<sup>a</sup> ed.). Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa* (3.<sup>a</sup> ed.). Virginia, U.S.A.: McGraw Hill.
- Chandrasekharam, D., & Bundschuh, J. (2008). *Low-Enthalpy Geothermal Resource for Power Generation*. London, United Kingdom: Taylor & Francis Group.
- DiPippo, R. (2008). *Geothermal Power Plants* (2.<sup>a</sup> ed.). Great Britain: ELSEVIER.
- Ellis, P., Collins, C., Keeney, R., Kirk, D., & Conover, M. (1983). *Corrosion Reference for Geothermal Downhole Materials Selection*. Texas, U.S.A.: Radian Corporation.
- Ellis, P., & Conover, M. (1981). *Materials Selection Guidelines for Geothermal Energy Utilization Systems*. Texas, U.S.A.: Radian Corporation.
- Guidos, J., & Burgos, J. (2012, marzo 11). Geothermal Activity and Development in El Salvador-Producing and Developing. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-14-07*, 12.
- Gutiérrez, J., Sanz, J., Oliveros, C., y Orozco, C. (2012). *Ventiladores para secadores de café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos*. Chinchiná, Colombia: FNC: CENICAFÉ.
- Haraldsson, I., & Cordero, A. (2014, marzo 11). Geothermal Baths, Swimming Pools and Spas: Examples from Ecuador and Iceland. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-18-22*, 14.
- Incropera, F. P. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6.<sup>a</sup> ed.). Mexico: Pearson Education, Inc.
- Kakac, S., & Liu, H. (2002). *Heat Exchangers Selection, Rating, and Thermal Design* (2.<sup>a</sup> ed.). Florida, U.S.A.: CRC Press.

- LaGeo - Energía Geotérmica en El salvador, centrales. (1999). Recuperado 9 de febrero de 2016, a partir de <http://www.lageo.com.sv/?cat=9&title=%BFQue%20es%20la%20Geotermia?&lang=es>
- Lee, J., y Delgado, C. (2013). *Modelamiento y Diseño de un Secador Estático de Café Pergamino (Silo de Café)* (Tesis de Grado). Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica, Risaralda, Colombia.
- Llopis, G., y Rodrigo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid, España: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Mburu, M. (2014, marzo 11). Geothermal Energy utilization at Oserian Flower Farm-Naivasha. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-18-24*, 6.
- Melara, E. (2011). Calcite Scaling in Geothermal Production Wells in El Salvador, Current Situation and Control Methodology. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-11-23*, 32.
- Prol-Ledesma, R. M. (2001). *El Calor de La Tierra*. U.S.A.: Fondo De Cultura Economica.
- Ragnarsson. (2014, marzo 11). Geothermal Energy in Aquaculture. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-18-25*, 5.
- Ragnarsson, Á., & Ágústsson, M. (2014, marzo 11). Geothermal Energy in Horticulture. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-18-23*, 7.
- Recinos, R. (2014, marzo 11). Geothermal Direct Applications in Central America and Mexico. *UNU-GTP and LaGeo, UNU-GTP-SC-18-30*, 12.
- Rodríguez, J. (2008, marzo). *El Salvador Geothermal*. PowerPoint presentation, Barbados. Recuperado a partir de [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/3338energy\\_rodriguez.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/3338energy_rodriguez.pdf)
- Romero, C., y Carranza, Y. (2007, agosto). Evaluación de la capacidad térmica de un radiador de calor. *Scientia et Technica Año XIII*, 35, 6.
- Shannon. (1975). *Economic Impact of Corrosion and Scaling Problems in Geothermal Energy Systems*. Washington, U.S.A.: Pacific Northwest Laboratories.

- Tarback, E., Lutgens, F., y Tasa, D. (2005). *Ciencia de la Tierra una introducción a la geología física* (8.<sup>a</sup> ed.). Madrid, España: Pearson Education, Inc.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook* (2.<sup>a</sup> ed.). Florida, U.S.A.: Taylor & Francis Group.
- Vaccaro, M. (2014). *Multidisciplinary approach for the sustainable utilization of medium-low temperature geothermal resources* (Dottorato). Università di Pisa, Pisa, Italia.
- Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson, M., & Pálsson, P. (2015). *Uses of geothermal energy in food and agriculture*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Welty, J., Wicks, C., Wilson, R., & Rorrer, G. (2008). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (5.<sup>a</sup> ed.). Massachusetts, U.S.A.: John Wiley & Sons.

## 10. ANEXOS

### Anexos A. Glosario

#### A

**Acero Inoxidable:** Aleación de acero con un mínimo del 10 % al 12 % de cromo contenido en masa, entre otros metales que puede contener la aleación son molibdeno y el níquel

**Acero Austenítico:** Tipo de acero inoxidable con un contenido habitual entre 18% cromo y 8% níquel.

**Aleación:** Agregado cristalino íntimo de dos o más metales o de metales y no metales que en estado sólido tiene propiedades metálicas y que son totalmente miscibles en estado líquido.

#### C

**Corrosión:** Deterioro de un material debido a un ataque electroquímico por el entorno.

**Caudal:** Cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal) por unidad de tiempo.

**Cuarzo:** Mineral compuesto de sílice siendo el segundo mineral más común en la corteza terrestre, estando en gran cantidad en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

**Caolinita:** Mineral tipo silicato estratificado, con una lámina de tetraedros unida a través de átomos de oxígeno en una lámina de octaedros de alúmina

#### E

**Energía Renovable:** Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

#### F

**Flasheo:** Evaporación instantánea de agua generada por una caída de presión del sistema.

**Feldespato:** Grupo de minerales tecto y aluminosilicatos que corresponden en volumen a tanto como el 60 % de la corteza terrestre.

## H

**Humedad:** Agua que impregna un cuerpo o al vapor presente en la atmósfera.

## I

**Incrustación:** Capa de residuos minerales que se forma en la superficies de algunos cuerpos.

## M

**Mica:** Minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas laminas flexibles, elásticas y muy brillantes

## N

**Número de Reynolds:** Es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido; Además relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional.

**Numero de Nusselt:** Numero adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción

**Número de Prandtl:** Numero adimensional proporcional al cociente entre la viscosidad de un fluido y la difusividad térmica.

## R

**Radiador:** Dispositivo que permite intercambiar calor entre dos medios, siendo uno de ellos, el aire ambiente. Sirve para disipar calor de un objeto o aparato para evitar su sobrecalentamiento o para aprovecharlo, calentando un espacio o un objeto. Generalmente trabaja por convección, pero también por radiación.

## S

**Secado:** Método de conservación de alimentos, consistente en extraer el agua de estos, lo que inhibe la proliferación de microorganismos y dificulta la putrefacción.

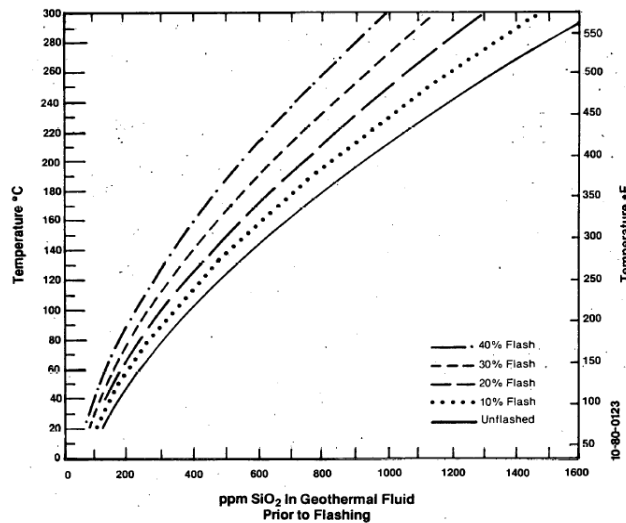
**Subducción:** Proceso de hundimiento de una placa litosférica bajo otra en un límite convergente, según la teoría de tectónica de placas.

## V

**Viscosidad:** Medida de la resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción en un fluido.

## Anexos B. Uso de diagramas para la saturación de sílice.

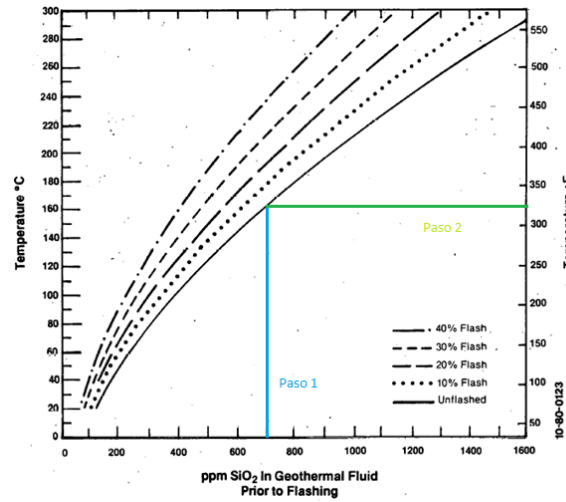
**Figura 10.1** Curva de saturación de la sílice para diferentes niveles de flasheo.



**Fuente:** Ellis & Conover (1981)

Ejemplo de cálculo: si un agua geotérmica contiene 700 ppm de sílice y este es enfriado en un proceso sin pérdida de agua por evaporación instantánea (flasheo), se puede obtener una temperatura de saturación de 325°F tal como se muestra en la figura 10.1 siguiendo dos pasos, paso 1 trazar una línea paralela al eje de las temperaturas partiendo de una concentración de 700ppm hasta tocar la curva (unflashed), luego en el paso 2 trazando una horizontal hasta tocar el eje de las temperaturas se obtiene la temperatura de 325°F, tal como se observa en la figura .10.23. Por debajo de 325°F comienza la precipitación de sílice y en consecuencia su incrustación puede ocurrir.

**Figura 10.2** Ejemplo curva de saturación de la sílice



**Fuente:** Ellis & Conover (1981)

**Anexo C.** Tablas de mediana entalpia.

**Tabla 10.1** Recurso geotérmico clase V

<u>Definición de parámetros:</u>	
Tipo de recurso	Vapor dominante.
Gases no condensables (% volumen)	Menor que 5
Cloruro	Menor a 1 ppm
Temperatura de entrada a la planta	320-360 °F
<u>Sitios de estudio:</u>	
✓ Italia- Boraciferous Region (10 sitios)	
✓ USA - The Geysers, CA	
<u>Corrosión observada en el acero al carbón.</u>	
✓ Los datos de las pruebas de materiales no están disponibles para el acero al carbono para vapor no aireado.	
✓ La aeración del vapor puede ser altamente corrosivo.	
<u>Rendimiento general de otras aleaciones:</u>	
✓ EL acero inoxidable tipo 316 es susceptible a la corrosión bajo tensión en una corriente húmeda aireado	
✓ El acero inoxidable tipo 316 utilizado en el condensado aireada y sin productos químicos de reducción de sulfuro de hidrógeno. Hidrógeno químicos sulfuro de reducción aumentan corrosividad de condensado.	
✓ El vapor geotérmico causa mayor corrosión por fatiga a los alabes de las turbinas de 12 Cr más que la calidad de las calderas.	

**Fuente:** Ellis et al. (1983)



**Tabla 10.2** Recurso geotérmico clase I

<u>Definición de parámetros:</u>	
Tipo de recurso	Líquido dominante.
Total de especies Clave	Menor a 100,000ppm
Fracción de cloruros en las especies clave	99 por ciento
pH (fluido sin flasheo)	De 5 a 6
pH (Fluido flasheado)	Mayor a 6
Volumen de gas en el vapor	Menor a 2.5%
Temperatura de entrada a la planta	Mayor a 390 °F
<u>Sitios de estudio:</u>	
✓ USA - Salton Sea, CA	
<u>Corrosión observada en el acero al carbón.</u>	
✓ En vapor separada no aireado, la razón de corrosión es 10 a 50 mpy con seria corrosión de picadura, depurara vapor no reduce la corrosión.	
<u>Rendimiento general de otras aleaciones:</u>	
✓ En acero inoxidable T316 con corrosión de hendidura y picadura además presenta corrosión bajo tensión.	

**Fuente:** Ellis et al. (1983)

**Tabla 10.3** Recurso geotérmico clase I

<u>Definición de parámetros:</u>	
Tipo de recurso	Líquido dominante.
Total de especies Clave	Entre 10,000 y 20,000ppm
Fracción de cloruros en las especies clave	45 a 99 por ciento
pH (fluido sin flasheo)	De 5 a 6
pH (Fluido flasheado)	Mayor que 6
Volumen de gas en el vapor	No establecido
Temperatura de entrada a la planta	300 a 375 °F
<u>Sitios de estudio:</u>	
✓ México - Cerro Prieto y USA - East Mesa (6-I), CA	
<u>Corrosión observada en el acero al carbón.</u>	
✓ En fluido separado no aireado, la razón de corrosión uniforme típicamente esta entre 5-10 mpy a temperaturas entre 300 y 375°F.	
✓ Corrosión es vapor separado no aireado es típicamente menor a 5 mpy.	
✓ El vapor condensado aireado es altamente corrosivo.	
<u>Rendimiento general de otras aleaciones:</u>	
✓ En acero inoxidable tipo 316 es susceptible a la corrosión por picadura y agrietamiento por corrosión bajo tensión en corriente líquida.	
✓ A altos esfuerzos las aleaciones de acero son susceptibles al agrietamiento por tensión por presencia del sulfuro.	

**Fuente:** Ellis et al. (1983)

**Tabla 10.4** Recurso geotérmico clase I

<u>Definición de parámetros:</u>	
Tipo de recurso	Líquido dominante.
Total de especies Clave	De 500 a 10,000ppm
Fracción de cloruros en las especies clave	45 a 99 por ciento
pH (fluido sin flasheo)	Mayor o igual a 5
pH (Fluido flasheado)	Mayor que 7
Volumen de gas en el vapor	Menor que 2.5 %
Temperatura de entrada a la planta	250 a 390 °F
<u>Sitios de estudio:</u>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El Salvador – Ahuachapán</li> <li>✓ Islandia - HTA (cuatro sitios )</li> <li>✓ Japón - Hatchobaru</li> <li>✓ Japón – Otake</li> <li>✓ Nueva Zelanda - Wairakei</li> <li>✓ Nueva Zelanda – Broadlands</li> <li>✓ USA - Raft River, I D</li> <li>✓ USA - Baca, NM</li> <li>✓ USA - Brady, H.S., NV</li> <li>✓ USA - Heber, CA</li> </ul>	
<u>Corrosión observada en el acero al carbón.</u>	
✓ En fluido no aireado entre el intervalo de 250 a 390°F, la razón de corrosión uniforme típicamente es menor a 5 mpy poca presencia de corrosión por picadura.	
✓ En vapor no aireado las razones de corrosión son típicamente menores a 5mpy.	
✓ A altos esfuerzos las aleaciones de acero son susceptibles al agrietamiento por tensión por presencia del sulfuro.	
✓ En vapor aireado condensado es muy corrosivo.	
<u>Rendimiento general de otras aleaciones:</u>	
✓ El acero inoxidable tipo 316 es susceptible al agrietamiento por el fluido aireado.	

**Fuente:** Ellis et al. (1983)

**Anexo D.** Tablas de las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo.

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p \times 10^{-3}$ (J/kg $\times$ K)	$\mu \times 10^5$ (Pa $\times$ s)	$\nu \times 10^5$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^2$ (W/m $\times$ K)	$\alpha \times 10^5$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr	$g\beta\rho^2/\mu^2$ (1/K $\cdot$ m <sup>3</sup> )
Air								
250	1.4133	1.0054	1.5991	1.1315	2.2269	1.5672	0.722	$4.638 \times 10^8$
260	1.3587	1.0054	1.6503	1.2146	2.3080	1.6896	0.719	2.573
280	1.2614	1.0057	1.7503	1.3876	2.4671	1.9448	0.713	1.815
300	1.1769	1.0063	1.8464	1.5689	2.6240	2.2156	0.708	1.327
320	1.1032	1.0073	1.9391	1.7577	2.7785	2.5003	0.703	0.9942
340	1.0382	1.0085	2.0300	1.9553	2.9282	2.7967	0.699	0.7502
360	0.9805	1.0100	2.1175	2.1596	3.0779	3.1080	0.695	0.5828
400	0.8822	1.0142	2.2857	2.5909	3.3651	3.7610	0.689	0.3656
440	0.8021	1.0197	2.4453	3.0486	3.6427	4.4537	0.684	0.2394
480	0.7351	1.0263	2.5963	3.5319	3.9107	5.1836	0.681	0.1627
520	0.6786	1.0339	2.7422	4.0410	4.1690	5.9421	0.680	0.1156
580	0.6084	1.0468	2.9515	4.8512	4.5407	7.1297	0.680	$7.193 \times 10^6$
700	0.5040	1.0751	3.3325	6.6121	5.2360	9.6632	0.684	3.210
800	0.4411	1.0988	3.6242	8.2163	5.7743	11.9136	0.689	1.804
1000	0.3529	1.1421	4.1527	11.1767	6.7544	16.7583	0.702	0.803

**Figura 10.3** Propiedades termofísicas del aire

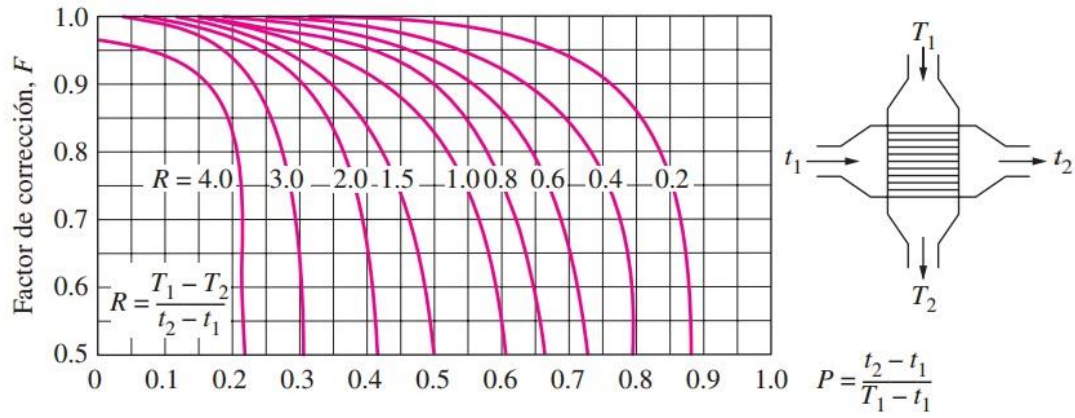
**Fuente:** Welty, Wicks, Wilson, & Rorrer (2008)

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg $\times$ K)	$\mu \times 10^6$ (Pa $\times$ s)	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k$ (W/m $\times$ K)	$\alpha \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr	$g\beta\rho^2/\mu^2 \times 10^{-9}$ (1/K $\cdot$ m <sup>3</sup> )
Water								
273	999.3	4226	1794	1.795	0.558	0.132	13.6	
293	998.2	4182	993	0.995	0.597	0.143	6.96	2.035
313	992.2	4175	658	0.663	0.633	0.153	4.33	8.833
333	983.2	4181	472	0.480	0.658	0.160	3.00	22.75
353	971.8	4194	352	0.362	0.673	0.165	2.57	46.68
373	958.4	4211	278	0.290	0.682	0.169	1.72	85.09
473	862.8	4501	139	0.161	0.665	0.171	0.94	517.2
573	712.5	5694	92.2	0.129	0.564	0.139	0.93	1766.0

**Figura 10.4** Propiedades termofísicas del agua

**Fuente:** Welty et al. (2008)

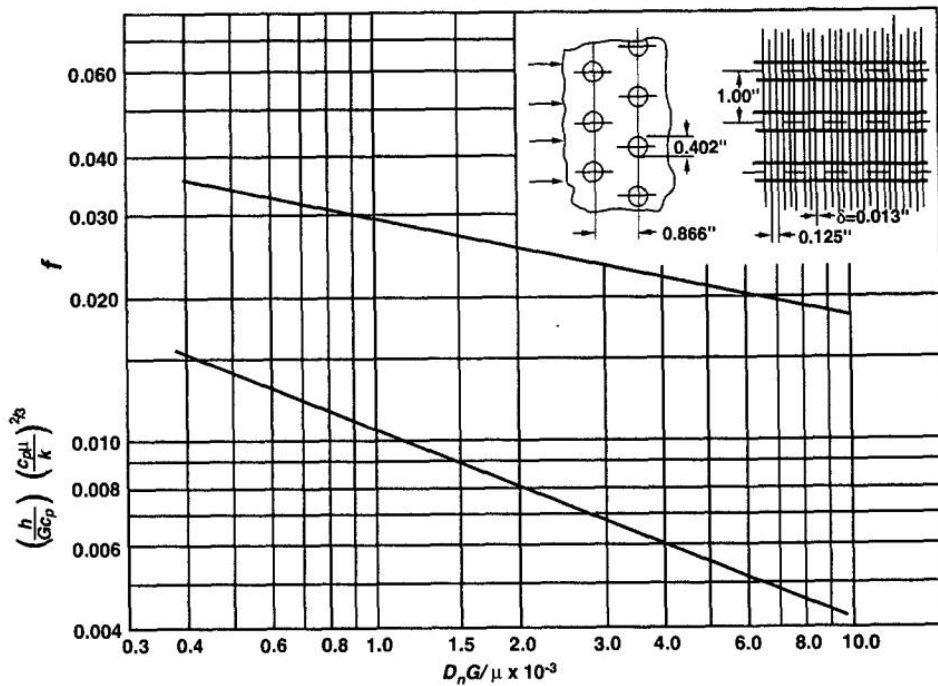
**Anexo E.** Grafico para el factor de corrección F



**Figura 10.5** Factor de corrección f, para un fluido mezclado y el otro no mezclado.

**Fuente:** Cengel (2007)

**Anexo F.** Grafico para el factor de Chilton (J).



**Figura 10.6** Factor J, para tubos con aletas planas.

**Fuente:** Kakac & Liu (2002)

## Anexo G. Códigos de MATLAB® para los intercambiadores de calor.

### 1. Código del intercambiador de calor tubo y coraza.

```
%Intercambiador de tubo y carcasa
clc;
clear;

%Solicitan datos del fluido a calentar Aire=a
disp('Datos del Aire')
ma=input('Ingrese el valor de flujo masico (kg/s):');
%ma=1.19;
tia=input('Ingrese el valor de temperatura inicial (°C):');
%tia=27;
toa=input('Ingrese el valor de temperatura final (°C):');
%toa=68;

%Solicita Cp del aire a las temperatura promedio
taprom=(tia+toa)/2;
cpa=capcala(taprom);
q=ma*cpa*(toa-tia);

%Solicitan datos del fluido caliente Agua=w
disp('Datos del Agua Geotermica')
mw=input('Ingrese el valor de flujo masico en kg/s:');
tiw=input('Ingrese el valor de temperatura inicial en °C:');
%tiw=90;
%tow=input('Ingrese el valor de temperatura final (°C):');
cpw=capcal(tiw);
tow=tiw-q/(mw*cpw);

while tow-twh>0.005
    twh=tow;
    twprom=(tiw+twh)/2;
    tow=tiw-q/(mw*cpw);
end

dt1=tiw-toa;
dt2=tow-tia;
dtln=(dt2-dt1)/log(dt2/dt1);

%Solicito Dato del factor de correccion f
P=(tow-tiw)/(tia-tiw);
R=(tia-toa)/(tow-tiw);

%Solicita f con P y R
fprintf('Ingrese f con el factor P de %4.3f, y R de %4.3f del grafico
anexado:',P,R);
f=input('');

%Solicito datos de los tubos
dd=input('Ingrese el diametro de tuberia (mm):');
```

```

%dd=19;
d=dd/1000;
st=input('Ingrese el valor de St (mm):');
%st=29;
St=st/1000;
sl=input('Ingrese el valor de Sl (mm):');
%sl=29;
Sl=sl/1000;

tipo=input('Ingrese el arreglo de tubos 1 para aligned o 0 si es
staggered:');
%tipo=1;

while (tipo~=0 && tipo~=1)
    tipo=input('Escriba 1 para aligned o 0 si es staggered:');
end

%Solicita datos: densidad, viscosidad, prandtl, conductividad
rhow=den(taprom);
miuw=visc(taprom);
nprw=npr(taprom);
kfw=cond(taprom);

%H dentro de los tubos

rhoa=dena(taprom);
miua=visca(taprom);
npraa=npra(taprom);
kfa=conda(taprom);

while pre~=0
    ntf=input('Ingrese la cantidad de tubos por fila:');
    nf=input('Ingrese la cantidad de filas de tubos:');
    %ntf=10;
    %nf=10;
    Vm=4*mw/(rhow*pi*d^2*ntf*nf);
    rew=(rhow*Vm*d*1000)/miuw;
    nuw=0.023*rew^(4/5)*nprw^0.3;
    hw=nuw*kfw/d;
    w=St*(ntf+2);
    BF=w*0.75;
    A=BF*w;
    Voo=ma/(rhoa*A);

    %H afuera de los tubos
    if tipo~=0
        Sd=sqrt(Sl^2+(St/2)^2);
        if Sd<(St+d)/2
            Vmax=St*Voo/(Sd-d);
        else
            Vmax=St*Voo/(St-d);
        end
    else
end

```

```

    Vmax=St*Voo/(St-d);
end

rea=rhoa*Vmax*d*1000/miua;
if 2000>=rea && rea>=40000
    c11=tabc1(dd,st,sl,tip);
    m1=tabm1(dd,st,sl,tip);
    nua=1.13*c11*(rea^m1)*npraa^(1/3);
    if nf<10
        c12=tabc2(tipo,nf);
        nua=nua*c12;
    end
else
    c21=input('Ingrese el valor de C1:');
    m2=input('Ingrese el valor de m:');
    nua=c21*(rea^m2)*(npraa^0.36);
    if nf<20
        c22=tc2(tipo,nf);
        nua=nua*c22;
    end
end
ha=nua*kfa/d;

%Calculos finales de calor
uu=1/hw+1/ha;
U=1/uu;
L=q/(U*ntf*pi*d*f);

%El numero de bafles
m=L/BF-1;
clc;
pre=input(';Esta de acuerdo con los mamparos obtenidos? Presione 1
para si y 0 para no:');

while (pre~=0 && pre~=1)
    tipo=input('si esta conforme con el resultado escriba 1 o 0
inconforme:');
end
end

clc;

                2. Código del intercambiador de calor compacto.

clc;
clear;

%Solicitan datos del fluido a calentar Aire=a
disp('Datos del Aire')
ma=input('Ingrese el valor de flujo masico (kg/s):');
tia=input('Ingrese el valor de temperatura inicial (°C):');
toa=input('Ingrese el valor de temperatura final (°C):');

%mw=1;

```

```

%tiw=90;

%sollicito datos de tubos
%Lw=28.4;
%Lh=540;
%La=540;

%Calculo previo Cp del aire a la temperatura promedio
taprom=(tia+toa)/2;
cpa=capcala(taprom);
q=ma*cpa*(toa-tia);

efn=(toa-tia)/(tiw-tia);
cpw=capcal(tiw);
tow=tiw-efn*(cpa*ma/(cpw*mw))*(tiw-tia);

while abs(ef-efn)>0.05
    ef=efn;
    while tow-twh>0.005
        twh=tow;
        twprom=(tiw+twh)/2;
        cpw=capcal(twprom);
        tow=tiw-ef*(cpa*ma/cpw*mw)*(tiw-tia);
    end

    Twprom=(tiw+tow)/2;

    %Solicita datos: densidad, viscosidad, prandtl, conductividad
    rhow=den(Twprom);
    miuw=visc(Twprom);
    nprw=npr(Twprom);
    kfw=cond(Twprom);
    cpw=capcal(Twprom);

    dt1=tiw-toa;
    dt2=tow-tia;
    dtln=(dt2-dt1)/log(dt2/dt1);

    %Solicita datos: densidad, viscosidad, prandtl, conductividad
    rhoa=dena(dtln);
    miua=visca(dtln);
    npra=npra(dtln);

    %Definicion de datos de dimension
    %%Aire
    dh=0.003633;
    Afra=la*lh;
    sigmaa=0.534;
    Aoa=Afra*sigmaa;
    alfaa=587;
    Ga=ma/Aoa;
    rea=Ga*dh*1000/(miua);

```



```

% Solicito datos de graficos
fprintf('j con Reynolds de %.2f del grafico anexo:', rea);
j=input('');

%% Agua
% Definicion los factores de dimension
d=0.00893;
Afrw=lw*lh;
xl=0.021996;
xt=0.0254;
sigmaw=(pi/4)*(d)^2/xt*xl;
nt=(lh/xt)*((lw/xl)+1)/2+((lh/xt)-1)*((lw/xl)-1)/2;
Aw=pi*d*la*nt;
Aow=(pi*nt*d^2)/4;
alfaw=Aw/(la*lh*lw);
rew=(mw*d)*1000/(miuw*Aow);
Aw=pi*d*la*nt;
Aow=(pi*nt*d^2)/4;
alfaw=Aw/(la*lh*lw);
rew=(mw*d)*1000/(miuw*Aow);
Aw=pi*d*la*nt;
Aow=(pi*nt*d^2)/4;
alfaw=Aw/(la*lh*lw);
rew=(mw*d)*1000/(miuw*Aow);

% Parte energetica
nuw=0.023*rew^(4/5)*nprw^0.3;
hw=nuw*kfw/d;

uu=1/(0.8*ha)+1/(ha*alfaw/alfaa);
U=1/uu;

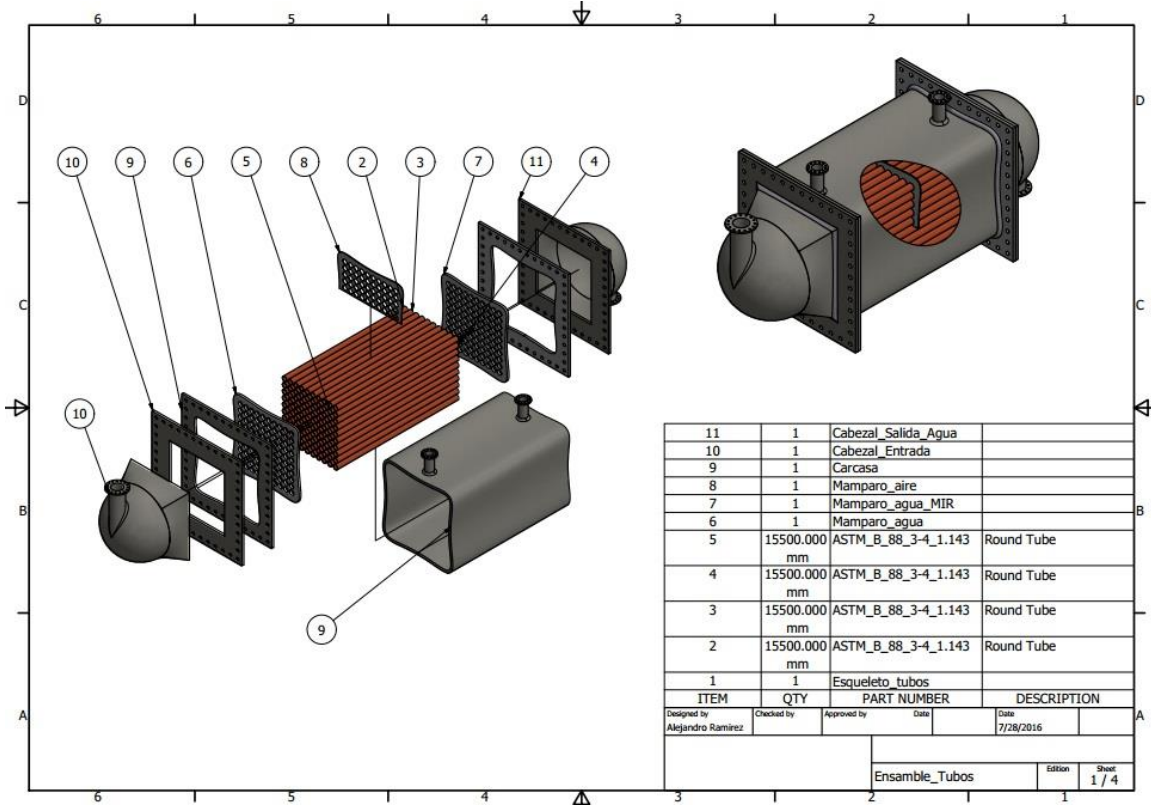
% Calculo del area total
de=0.0102108;
Aa=pi*de*la*nt+2*(lw*lh-(pi*nt*de^2)/2);
ntu=Aa*U/(ma*cpa);
c=cpa*ma/(cpw*mw);
efn=1-exp(((ntu^0.22)/c)*(exp(-c*ntu^0.78)-1));
tow=tiw-efn*ma*cpa*(tiw-tia)/(mw*cpw);
end

Q=cpa*(tiw-tia)*efn;

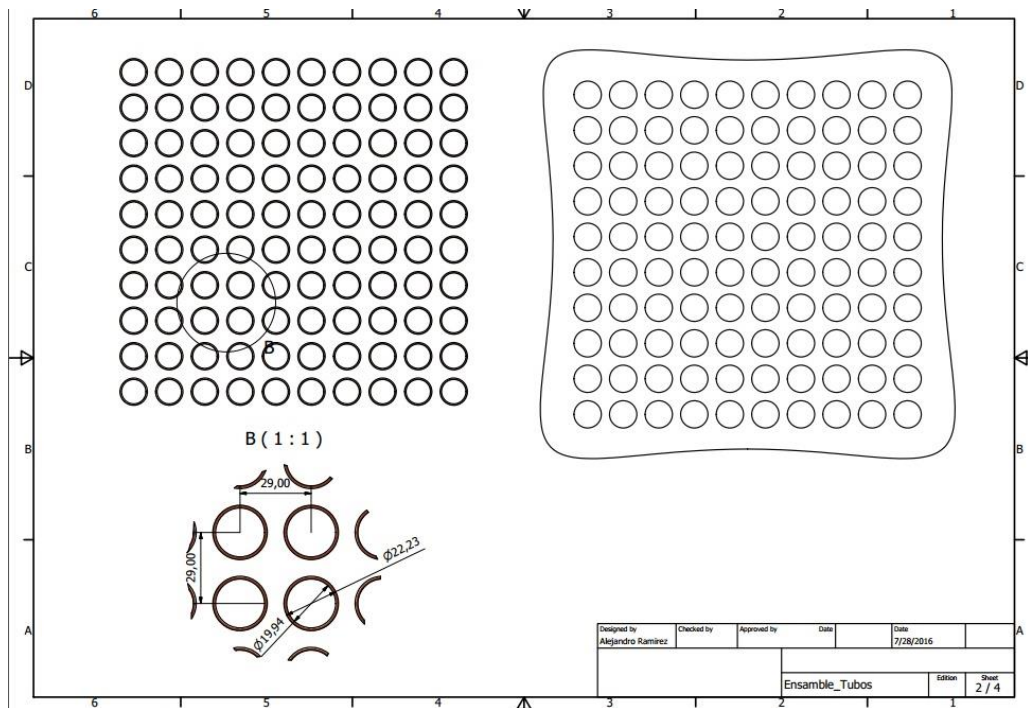
```

**Anexo H. Planos de los intercambiadores de calor**

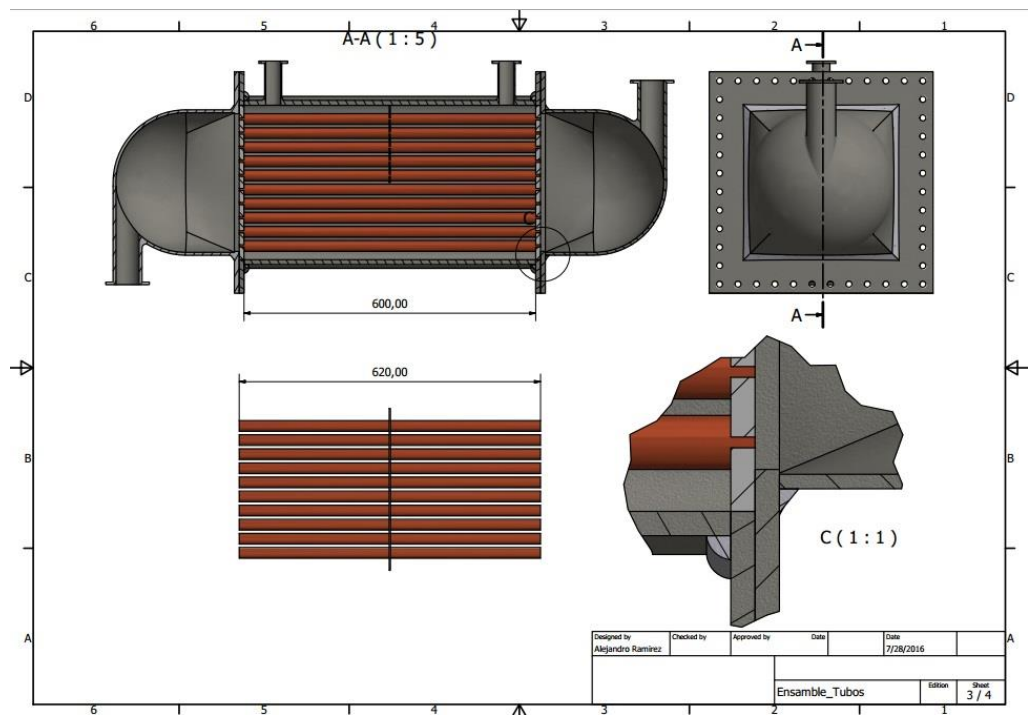
**1. Planos de construcción para el intercambiador tubo y coraza**



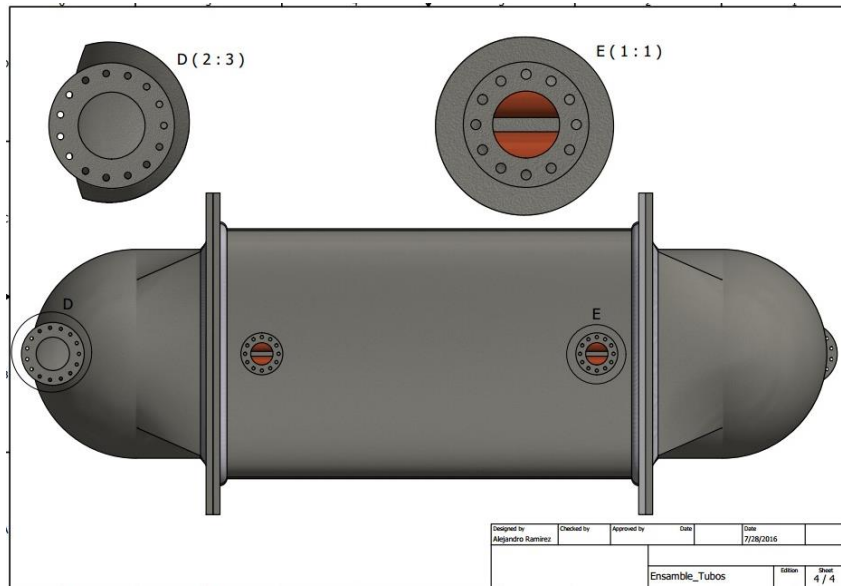
**Figura 10.7a** Planos en AUTOCAD del intercambiador tubo y coraza.



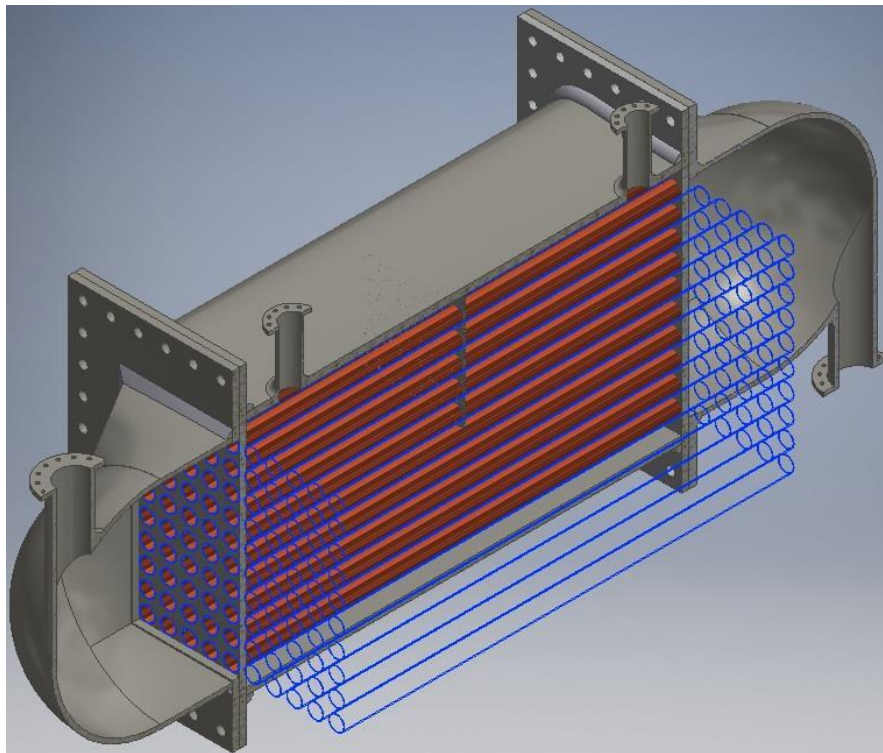
**Figura 10.8b** Planos en AUTOCAD del intercambiador tubo y coraza.



**Figura 10.9c** Planos en AUTOCAD del intercambiador tubo y coraza.



**Figura 10.10d** Planos en AUTOCAD del intercambiador tubo y coraza.



**Figura 10.11e** Planos en AUTOCAD del intercambiador tubo y coraza.

## 2. Planos de construcción para el intercambiador compacto

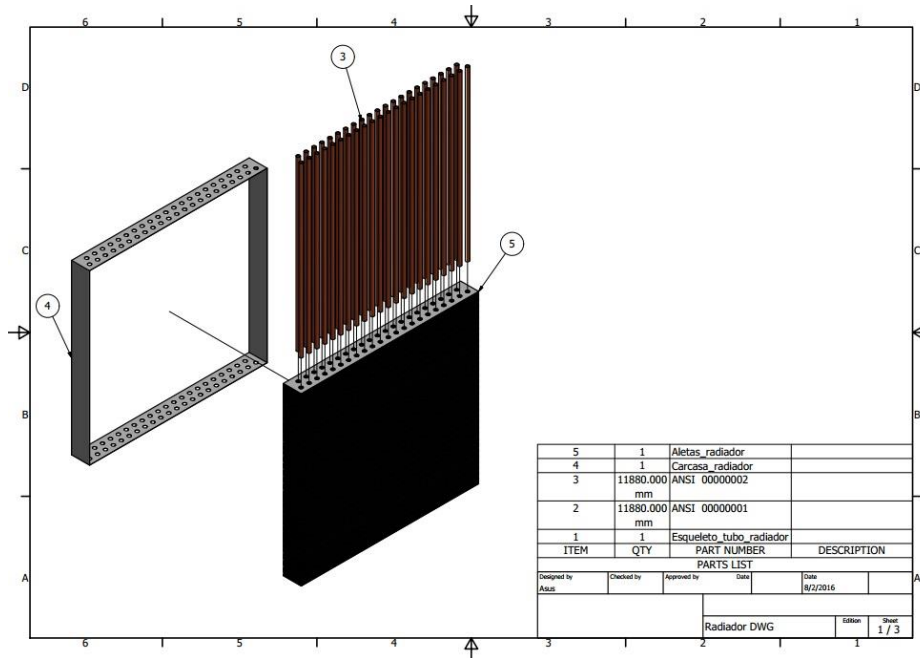


Figura 10.12a Planos en AUTOCAD del intercambiador compacto.

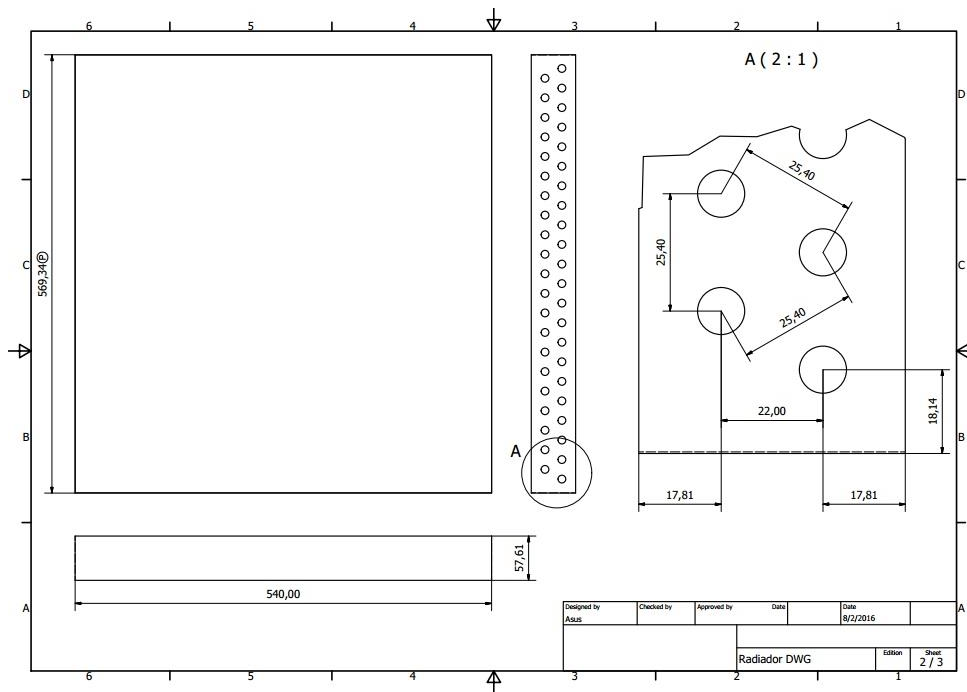
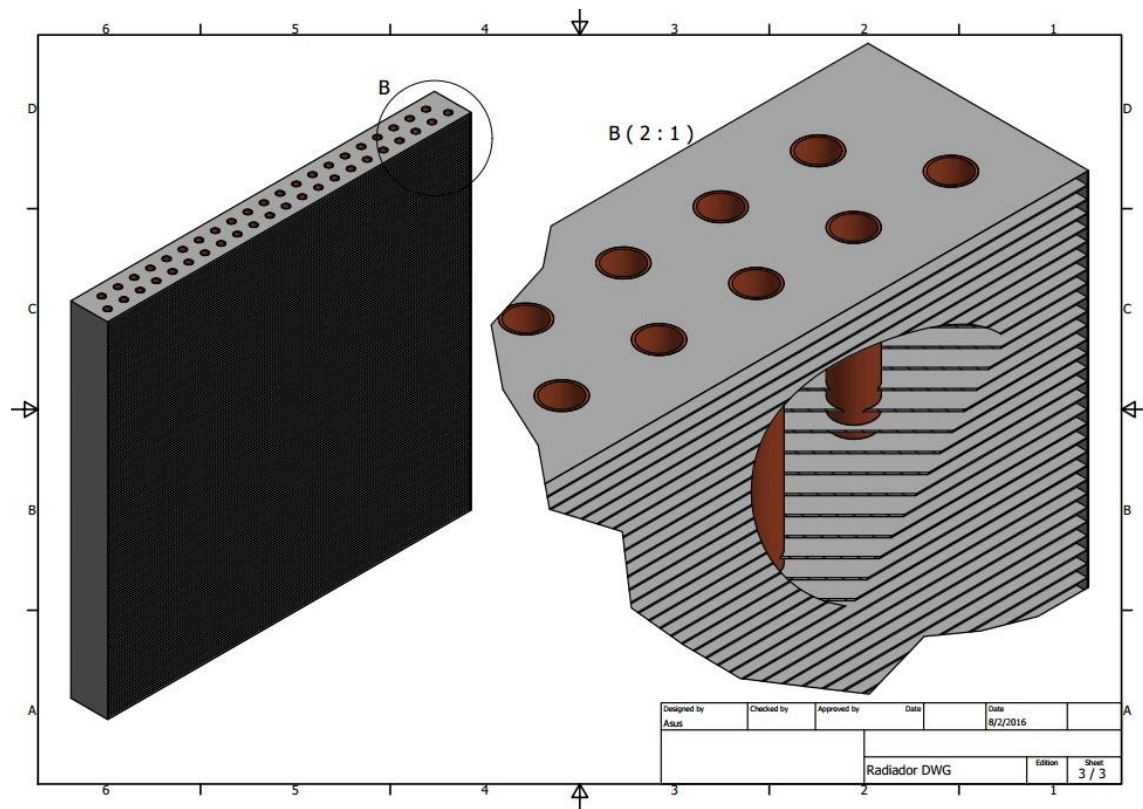


Figura 10.13b Planos en AUTOCAD del intercambiador compacto.



**Figura 10.14c** Planos en AUTOCAD del intercambiador compacto.