



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA
EDICION 2016



TEMA:

“Evaluación de las condiciones de diseño y operación de un vaporizador tipo Kettle para planta geotérmica de ciclo binario.”

PRESENTAN:

Kriscia Yasmín Parada
Gyzel Beatriz Pérez Orellana
Fidel Ernesto Velásquez Martell

ASESOR:

Guillermo Francisco Martínez Cobar
Erick Gregorio Reyes Magaña

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2016

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1. VARIABLES DE ENTRADA	6
1.2. VARIABLES DE SALIDA	6
1.3. CRITERIOS	7
1.4. RESTRICCIONES	7
1.5. USO	7
1.6. VOLUMEN	7
1.7. TIEMPO	7
2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	8
3. OBJETIVOS	8
3.1. OBJETIVO GENERAL	8
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4. MARCO TEÓRICO	9
4.1. TRANSFERENCIA DE CALOR	9
4.1.1. CONDUCCIÓN	9
4.1.2. CONVECCIÓN	9
4.1.3. RADIACIÓN	10
4.2. INTERCAMBIADORES DE CALOR	10
4.2.1. TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	11
4.2.2. APLICACIONES GENERALES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR	13
4.2.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR EN PLANTAS BINARIAS	15
4.3. PLANTAS GEOTÉRMICAS BINARIAS	16
4.3.1. CICLO BINARIO	16
4.3.2. BRINE BOTTOMING SYSTEM (BBB)	17
4.3.3. SPENT STEAM BOTTOMING BINARY (SSBB)	18
4.3.4. SISTEMA HÍBRIDO: COMBINACIÓN DE “BBB” Y “SSBB”	19
4.3.5. FLUIDOS DE TRABAJO	20
4.4. INCRUSTACIÓN	21

5. METODOLOGÍA.....	23
6. ANÁLISIS DE DATOS.....	25
6.1. INCRUSTACIÓN EN EL VAPORIZADOR	25
6.2. MÉTODO P-NTU _T PARA DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD TÉRMICA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	28
6.3 MODELADO 3D DE VAPORIZADOR EN SOFTWARE DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	30
7. RESULTADOS	34
7.1 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN CON EES.	34
7.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CONDICIONES DE DISEÑO EN SOFTWARE DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	35
7.2.1 LADO TUBO.	35
7.2.2 LADO CARCASA.....	39
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	43
AGRADECIMIENTOS	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
LIBROS	45
DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y SITIOS WEB	45
APÉNDICES	47
A. SEGUIMIENTO DEL PROYECTO	47
A.1. PROGRAMA DE ACTIVIDADES	47
A.2. DIAGRAMA DE GANTT.....	48
A.3. ESCALA DE TIEMPO DEL PROYECTO.....	48

RESUMEN

La planta geotérmica analizada es un sistema combinado del tipo Brine Bottoming System (BBB), en la cual existe una planta a condensación y un ciclo binario acoplado a la línea de reinyección. El proyecto pretende proveer una línea base para el rediseño del vaporizador tipo Kettle utilizado en el ciclo binario, mejorando la disponibilidad del equipo y su eficiencia.

La caracterización del vaporizador se realizó a través de Engineering Equation Solver (EES), considerando los principales parámetros de funcionamiento, teniendo este modelo como base, se modeló el equipo a través de un software de elementos finitos, tomando como referencia la técnica numérica denominada Método de los Elementos Finitos (FEM).

La validación de este modelo se realizó a través de la simulación recreando las condiciones de diseño para el vaporizador. Además, se estudió del proceso de incrustación de sílice mediante el análisis de regresión de datos estadísticos que relacionan el tiempo y espesor de depositación de sílice.

Finalmente en la evaluación de los resultados de la simulación se pudo concluir que el modelo base proporciona una alta confiabilidad por lo que puede ser utilizado para simular en él condiciones de operación de plantas binarias reales.

INTRODUCCIÓN

El presente informe del proyecto de investigación: “Evaluación de las condiciones de diseño y operación de un vaporizador tipo Kettle para una planta geotérmica de ciclo binario”, tiene como propósito principal servir de línea base para el rediseño de vaporizadores tipo Kettle en la central geotérmica binaria analizada.

El planteamiento del problema constituye el primer apartado del informe, donde se estructuró formalmente la investigación delimitando el campo y los límites dentro de los cuales se desarrolló el proyecto.

El segundo y tercer apartado está constituido por la Justificación y los Objetivos del Proyecto, que avalan el desarrollo de la investigación a través de aspectos clave que serán analizados de acuerdo a los propósitos principales.

En el Marco teórico se exponen las consideraciones teóricas o referenciales acerca de los intercambiadores de calor, plantas geotérmicas binarias y procesos de incrustación y transferencia de calor, lo que permite una orientación de la investigación según los antecedentes disponibles y situándola dentro de un conjunto de definiciones y conocimientos.

La Metodología presenta las distintas etapas requeridas para llevar a cabo la investigación, así como los insumos utilizados y herramientas analíticas adaptadas a la naturaleza de la misma, teniendo como orientación la finalidad de cada etapa.

Se presenta además, el Análisis de datos e interpretación de Resultados producto de la simulación generada basándose en las recomendaciones del fabricante para el intercambiador en estudio.

Finalmente se exponen las Conclusiones y Recomendaciones basándose en los resultados obtenidos de la simulación, y se brindan las Referencias Bibliográficas para su consulta posterior.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



“Vaporizador incapaz de manejar eficientemente los efectos de incrustación, corrosión e intrusión generados por el uso agua geotérmica como fluido de aporte de calor.”

“Línea base para el rediseño del Vaporizador que mejore la disponibilidad del equipo.”

1.1. VARIABLES DE ENTRADA

Variable	Limitación
Valores históricos de incrustación de sílice	Registro limitado de incrustación de sílice
Condiciones de diseño del vaporizador recomendadas por el fabricante	Válidas sólo para el vaporizador estudiado.
Condiciones teóricas de operación del vaporizador	Basados en condiciones ideales de operación.
Condiciones de construcción del vaporizador	Válidas sólo para el vaporizador estudiado.
Condiciones de operación real del vaporizador	Variaciones en la operación de la planta y manejo Campo Planta

1.2. VARIABLES DE SALIDA

Variable	Limitación
Función matemática aproximada de incrustación de sílice	Basada en datos históricos.

Información para la evaluación de la eficiencia del vaporizador Kettle estudiado

Resultado de evaluación depende del enfoque utilizado.

Conocimiento sobre el proceso de incrustación de sílice

Basada en el registro histórico disponible actualmente.

1.3. CRITERIOS

- Función matemática obtenida para la incrustación con coeficiente de correlación ≥ 0.9
- Datos de simulación aproximados según la especificación de diseño recomendada.

1.4. RESTRICCIONES

- Línea base para rediseño de vaporizador Kettle es válida para las condiciones del caso estudiado, en otros estudios se recomienda el uso solamente de referencia.
- Información limitada sobre el comportamiento real de la incrustación de sílice para otros caso de estudio.
- Características químicas del agua geotérmica pueden variar la tendencia o comportamiento de la incrustación de sílice.

1.5. USO

Línea base puede ser reutilizada el número de veces necesario en futuros rediseños del vaporizador Kettle estudiado, considerando que diversos diseños pueden ser propuestos como alternativa óptima dependiendo del manejo de la planta geotérmica y proyectos futuros de la organización.

1.6. VOLUMEN

La cantidad de vaporizadores a rediseñar utilizando esta línea base es solamente uno.

1.7. TIEMPO

Línea base para rediseño del vaporizador Kettle estudiado debe elaborarse en un período mínimo de 2.5 y máximo de 6 semanas, según calendarización.

2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En un sistema de generación de energía eléctrica a través de plantas geotérmicas de ciclo binario, el elemento que permite al agua geotérmica transferir su energía hacia el fluido de trabajo es el vaporizador, la función del vaporizador es transformar el fluido de trabajo de estado líquido a vapor. Por lo anterior, la evaluación de la eficiencia de transferencia de calor del equipo es de vital importancia para el correcto funcionamiento de la planta y para mejorar la disponibilidad de la misma.

El proyecto permitirá validar el modelo y generar una línea base que permitirá proponer correcciones, mejoras e incluso un rediseño del mismo para optimizar su funcionamiento y evitar paros por mantenimientos del equipo.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y validar el diseño de un vaporizador tipo Kettle instalado en una planta de ciclo binario para generar una línea base que permita a partir de condiciones de operación futuros rediseños con el fin de mejorar la disponibilidad del equipo.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar el modelo mecánico de un vaporizador tipo Kettle tomando como referencia las condiciones de diseño.
- Simular mediante el método de análisis de elementos finitos las condiciones de diseño del vaporizador para validar en el modelo computacional la dinámica de los fluidos
- Realizar un estudio del proceso de incrustación de sílice en su paso por el intercambiador de calor.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor es energía en movimiento, se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia; cuando dos cuerpos que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto entre sí, se produce una transferencia de calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. La transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos físicos: conducción, convección y radiación.

4.1.1. CONDUCCIÓN

La conducción es el mecanismo de transferencia en escala atómica, por el choque de unas moléculas con otras, las partículas más energéticas entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas.

Para el caso de un flujo estacionario en una sola dirección, el calor transmitido es proporcional al área perpendicular al flujo, a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura; y es inversamente proporcional al espesor como lo describe la Ley de Fourier.

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{(\Delta T)}{x}$$

Donde,

$\frac{dQ}{dt}$ es el calor transmitido por unidad de tiempo.

k es la conductividad térmica

A es el área de la superficie de contacto.

ΔT es la diferencia de temperatura.

x es el espesor de material.

4.1.2. CONVECCIÓN

Se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas; la transferencia de calor se da por medio del movimiento del fluido. La convección se expresa por medio de la ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Donde,

h : coeficiente de convección

A_s : el área del cuerpo en contacto con el fluido

T_s : temperatura en la superficie del cuerpo

T_∞ : es la temperatura del fluido lejos del cuerpo

4.1.3. RADIACIÓN

La radiación es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada. Esta energía es producida por el cambio en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivo y transportado por ondas electromagnéticas o fotones.

4.2. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten la transferencia de calor desde un fluido caliente hasta otro frío. Las aplicaciones en la industria son muy variadas, desde calentamiento, ventilación, acondicionamiento de espacios, enfriamiento de fluidos, calderas, entre otras.

La forma más simple de un intercambiador de calor es un intercambiador de calor de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza), como se muestra en la Figura 1 y que se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos. Un fluido corre por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Algunas veces el tubo interno tiene un par de vueltas dentro de la coraza para aumentar el área de transferencia de calor y, por consiguiente, la tasa de transferencia de calor. Las cámaras de mezclado se clasifican a veces como intercambiadores de calor de contacto directo.

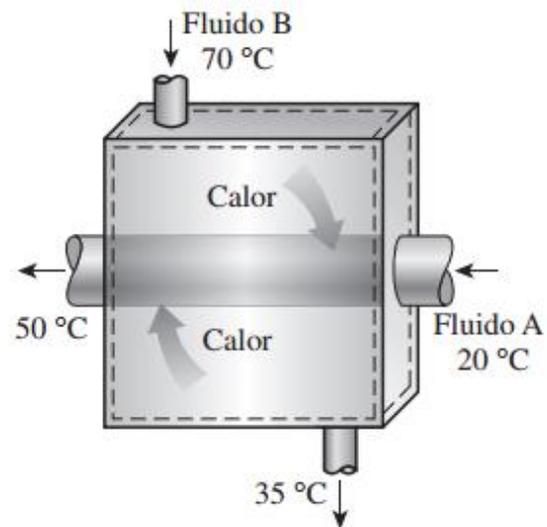


Figura 1. Intercambiador de calor de tubo doble.

El principio de conservación de la masa para un intercambiador de calor que opera de forma estacionaria requiere que la suma de los flujos másicos de entrada sea igual a la suma de los flujos másicos que salen. Este principio se puede expresar también como sigue: en operación estacionaria, el flujo másico de cada corriente de fluido que fluye por un intercambiador de calor permanece constante.

Los intercambiadores de calor comúnmente no tienen que ver con interacciones de trabajo ($w = 0$) y los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes ($\Delta ec \approx 0, \Delta ep \approx 0$) para cada corriente de fluido. La tasa de transferencia de calor relacionada con los intercambiadores de calor depende de cómo se selecciona el volumen de control. Los intercambiadores de calor están diseñados para transferencia de calor entre dos fluidos dentro del dispositivo, por lo que normalmente la coraza externa está bien aislada para evitar cualquier pérdida de calor hacia el medio circundante.

Cuando todo el intercambiador de calor se selecciona como el volumen de control, Q se vuelve cero porque la frontera para este caso queda justo debajo del aislamiento y poco o nada de calor la cruza (Ver Figura 2). Sin embargo, si únicamente se selecciona un fluido como el volumen de control, entonces el calor cruzará esta frontera y pasa de un fluido a otro, y Q no será cero. De hecho, Q en este caso será la tasa de transferencia de calor entre los dos fluidos (Cengel y Boles, 2012).

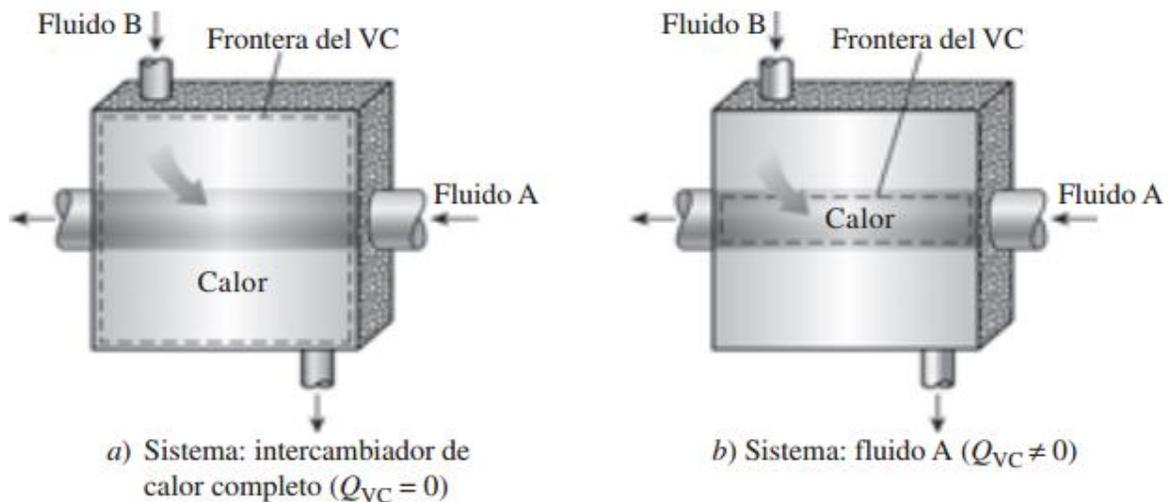


Figura 2. Sistema de intercambiadores.

La transferencia de calor relacionada con un intercambiador de calor puede ser cero o distinta de cero dependiendo de cómo se elija el volumen de control.

4.2.1. TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Contacto indirecto o recuperadores

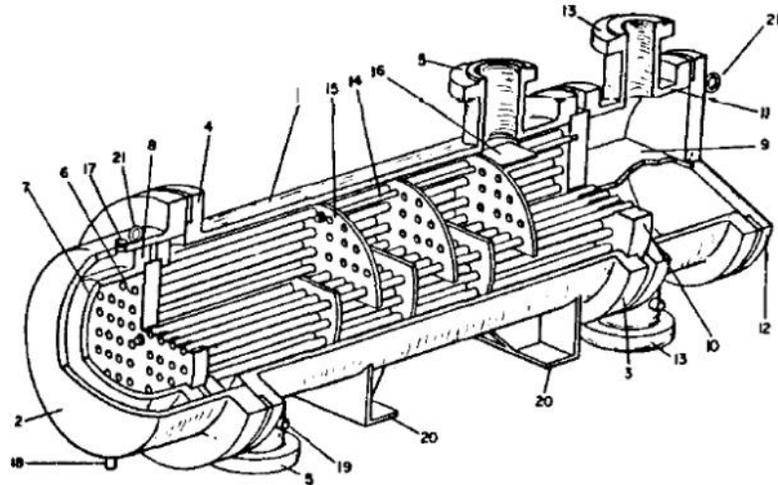
Tubos concéntricos o doble tubo

Los intercambiadores de calor de tubos concéntricos o doble tubo son los más sencillos que existen. Están constituidos por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Uno de los fluidos fluye por el interior del tubo de menor diámetro y el otro fluido fluye por el espacio anular entre los dos tubos.

Coraza y tubos

El intercambiador de calor de coraza y tubos es el más utilizado en la industria. Está formado por una coraza y por multitud de tubos. Se clasifican por el número de veces que pasa el fluido por la coraza y por el número de veces que pasa el fluido por los tubos.

En los intercambiadores de calor de paso múltiple se utiliza un número par de pasos en el lado del tubo y un paso o más por el lado de la coraza. En la Figura 3 se puede observar una descripción de los componentes principales de un intercambiador de calor tipo coraza.



1	Coraza	8	Brida del Cabezal Flotante	15	Baffles
2	Casquete posterior de la coraza	9	Canal Distribuidos	16	Placa de Choque
3	Shell Channel?	10	Placa Tubular Fija	17	Conexión para venteo
4	Brida del casquete posterior	11	Distribuidor	18	Conexión para drenaje
5	Boquilla de la coraza	12	Tapa del distribuidor	19	Conexión para instrumentación
6	Placa Tubular Flotante	13	Boquillas del distribuidor	20	Silleta para soporte
7	Cabezal Flotante	14	Varillas para sujeción y espaciado	21	Talón Elevador

Figura 3. Componentes principales de un intercambiador de coraza.

Evaporadores

Un evaporador es un intercambiador de calor de coraza y tubos. Las partes esenciales de un evaporador son la cámara de calefacción y la cámara de evaporación. El haz de tubos corresponde a una cámara y la coraza corresponde a la otra cámara. La coraza es un cuerpo cilíndrico en cuyo interior está el haz de tubos.

Las dos cámaras están separadas por la superficie sólida de los tubos, a través de la cual tiene lugar el intercambio de calor. La forma y la disposición de estas cámaras, diseñadas para que la eficacia sea máxima, da lugar a distintos tipos de evaporadores.

Placas

Un intercambiador de calor de placas consiste en una sucesión de láminas de metal armadas en un bastidor y conectadas de modo que entre la primera y la segunda placa circule un fluido, entre la segunda y la tercera otro, y así sucesivamente. Estas placas están separadas por juntas, fijadas en una coraza de acero.

La circulación de estos fluidos puede tener diferentes configuraciones, en paralelo y contracorriente.

Compacto

Los intercambiadores de calor compactos están diseñados para conseguir una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen.

En los intercambiadores compactos, los dos fluidos normalmente se mueven en direcciones ortogonales entre sí. Esta configuración del flujo recibe el nombre de flujo cruzado. El flujo cruzado se clasifica en mezclado (uno de los dos fluidos fluye libremente en dirección ortogonal al otro sin restricciones) y no mezclado (se ponen unas placas para guiar el flujo de uno de los fluidos).

Ejemplos de intercambiadores de calor compactos son los radiadores de los coches, los intercambiadores de calor de cerámica de vidrio de las turbinas de gas, el regenerador del motor Stirling y el pulmón humano.

Regeneradores

En un regenerador, la transferencia de calor entre dos corrientes es transportada por el paso alternado de fluidos calientes y fríos a través de un lecho de sólidos, el cual tiene una apreciable capacidad de almacenamiento de calor. El fluido caliente proporciona calor a los sólidos que se calientan de forma gradual; pero antes de llegar al equilibrio los flujos son cambiados y entonces el fluido frío remueve el calor del lecho. En un tipo de regenerador se utilizan dos lechos idénticos, como en un sistema absorbedor-desorbedor. Un segundo tipo utiliza un lecho rotatorio con forma de una llanta gruesa, con el fluido frío que circula axialmente a través del sector (generalmente 180°) del lecho, mientras que el fluido caliente circula en una dirección contraria a través del otro sector. En regeneradores rotatorios, el lecho es frecuentemente una matriz de barras, pantallas o láminas corrugadas, hace que tenga una gran área de superficie, pero además, una alta fracción de vacíos y una caída de presión más baja que un lecho de partículas.

Contacto directo

Torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son un tipo de intercambiadores de calor que tienen como finalidad quitar el calor de una corriente de agua caliente, mediante aire seco y frío, que circula por la torre.

El agua caliente puede caer en forma de lluvia y al intercambiar calor con el aire frío, vaporiza una parte de ella, eliminándose de la torre en forma de vapor de agua.

4.2.2. APLICACIONES GENERALES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor se encuentran en muchos sistemas químicos o mecánicos. Estos sirven, como su nombre lo indica, para ganar calor o expeler calor en determinados

procesos. Algunas de las aplicaciones más comunes se encuentran en calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y precalentadores o enfriamiento de fluidos. En este apartado se revisan algunas aplicaciones específicas de intercambiadores de calor. Se intenta proveer varios ejemplos específicos de cómo funciona un intercambiador de calor en un determinado sistema, claro está que no se cubren todas las aplicaciones posibles.

Precalentador: En sistemas de vapor de gran escala, o en sistemas donde se requieren grandes temperaturas, el fluido de entrada es comúnmente precalentado en etapas, en lugar de tratar de calentar dicho fluido en una sola etapa desde el ambiente hasta la temperatura final. El precalentamiento en etapas incrementa la eficiencia de la planta y minimiza el choque térmico de los componentes, que es el caso de inyectar fluido a temperatura ambiente en una caldera u otro dispositivo operando a alta temperatura. En el caso de sistemas de generación de vapor, una porción del vapor generado es sustraído y utilizado como fuente de calor para recalentar el agua de alimentación en etapas.

Radiador: Comúnmente, los intercambiadores de calor están pensados como dispositivos líquido-a-líquido solamente. Pero un intercambiador de calor es cualquier dispositivo que transfiere calor a partir de un fluido a otro fluido. Algunas plantas dependen de intercambiadores de calor aire/líquido. El ejemplo más familiar de un intercambiador de calor aire-a líquido es un radiador de automóvil. El líquido refrigerante fluye por el motor y toma el calor expelido y lo lleva hasta el radiador. El líquido refrigerante fluye entonces por tubos que utilizan aire fresco del ambiente para reducir la temperatura del líquido refrigerante. Ya que el aire es un mal conductor del calor, el área de contacto térmico entre el metal del radiador y el aire se debe maximizar. Esto se hace usando aletas en el exterior de los tubos. Las aletas mejoran la eficacia de un intercambiador de calor y se encuentran comúnmente en la mayoría de los intercambiadores de calor del aire/líquido y en algunos intercambiadores de calor líquido/líquido de alta eficacia.

Aire acondicionado, evaporador y condensador: Todos los sistemas de aire acondicionado contienen por lo menos dos intercambiadores de calor, generalmente llamados evaporador y condensador. En cualquier caso, el evaporador o el condensador, el refrigerante fluye en el intercambiador de calor y transfiere el calor, ya sea ganándolo o expeliéndolo al medio frío. Comúnmente, el medio frío es aire o agua. En el caso del condensador, el gas refrigerante caliente de alta presión se debe condensar a un líquido subenfriado. El condensador logra esto enfriando el gas al transferir su calor al aire o al agua. El gas enfriado es entonces condensado en líquido. En el evaporador, el refrigerante subenfriado fluye en el intercambiador de calor, y el flujo del calor se invierte, con el refrigerante relativamente frío se absorbe calor absorbido del aire más caliente que fluye por el exterior de los tubos. Esto enfría el aire y hace hervir al refrigerante.

Condensadores de vapor: El condensador del vapor, es un componente importante del ciclo del vapor en instalaciones de generación de potencia. Es un recinto cerrado en el cual

el vapor sale de la turbina y se fuerza para ceder su calor latente de la vaporización. Es un componente necesario del ciclo del vapor por dos razones. La primera, convierte el vapor usado nuevamente en agua para regresarla al generador o a la caldera de vapor como agua de alimentación. Esto baja el costo operacional de la planta permitiendo reutilizar el agua de alimentación, y resulta más fácil bombear un líquido que el vapor. La segunda razón, aumenta la eficiencia del ciclo permitiendo que el ciclo funcione opere con los gradientes más grandes posibles de temperatura y presión entre la fuente de calor (caldera) y el sumidero de calor (condensador). Condensando el vapor del extractor de la turbina, la presión del extractor es reducida arriba de la presión atmosférica hasta debajo de la presión atmosférica, incrementando la caída de presión del vapor entre la entrada y la salida de la turbina de vapor. Esta reducción de la presión en el extractor de la turbina, genera más calor por unidad de masa de vapor entregado a la turbina, por conversión de poder mecánico. Ya que ocurre condensación, el calor latente de condensación se usa en lugar del calor latente de vaporización. El calor latente del vapor de la condensación se pasa al agua que atraviesa los tubos del condensador. Después de que el vapor condensa, el líquido saturado continúa transfiriendo calor al agua que se enfría al ir bajando hasta el fondo del condensador. Algunos grados de subenfriado previenen la cavitación de la bomba.

4.2.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR EN PLANTAS BINARIAS

VAPORIZADOR KETTLE

Los vaporizadores tipo kettle se usan principalmente para vaporización en el lado de la carcasa, es decir, generación de vapor. Normalmente, el líquido frío entrando en el intercambiador de calor está cerca de su punto de vaporización con respecto a la presión del fluido dada. El fluido caliente fluyendo en el lado del tubo puede ser vapor de condensación o de dos fases.

Este tipo de vaporizador es un intercambiador de calor sin deflectores. El haz de tubos es sumergido bajo un nivel de líquido y normalmente ocurre un fenómeno de vaporización nucleada. En un kettle, el líquido generalmente entra a través del fondo de la carcasa. El calor se transfiere por ebullición nucleada a través del efecto combinado de la convección libre de líquido y convección adicional producida por la elevación del chorro de burbujas.

En el lado de la carcasa, el calor sensible requerido para calentar el líquido a su punto de vaporización es realzado guiando el líquido a través de baffles, permitiendo un incremento de velocidad y mayor tiempo de contacto. Sin embargo, estos resultados no son posibles en el kettle, ya que está sin deflectores.

Teniendo esto en cuenta, la correlación del coeficiente de transferencia de calor considera un factor de corrección que está relacionado con el ratio de calor sensible y calor total. En la Figura 4 se puede observar el diseño general de funcionamiento de un vaporizador tipo kettle.

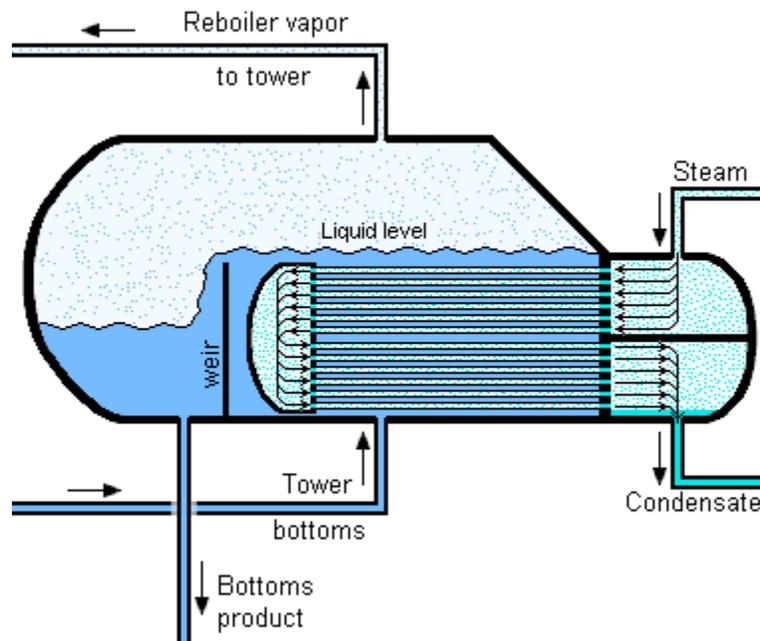


Figura 4. Funcionamiento de vaporizador tipo Kettle.

4.3. PLANTAS GEOTÉRMICAS BINARIAS

Actualmente los procesos de ciclo binario se utilizan con frecuencia para aprovechar los recursos hidrotermales de media entalpía disponibles en el subsuelo. El recurso hidrotermal calienta un fluido de trabajo secundario con un punto de vaporización a temperatura mucho más baja, que luego se expande en una turbina térmica acoplada a un generador eléctrico.

4.3.1. CICLO BINARIO

Son sistemas de aprovechamiento de energía en “cascada” que aprovechan la energía térmica de desecho (agua de reinyección, vapor de la turbina a contrapresión) la cual es transferida a un fluido de trabajo de menor temperatura de ebullición.

Los sistemas de ciclo binario pueden ser utilizados en los yacimientos hidrotérmicos de entalpía media (100 C°-200 C°), donde predomina el agua líquida (Ver Figura 5). Este tipo de plantas emplean un segundo fluido de trabajo, con un punto de ebullición (a presión atmosférica) inferior al del agua, tales como isopentano, freón, isobutano, etc., los cuales se vaporizan y se usan para accionar la turbina.

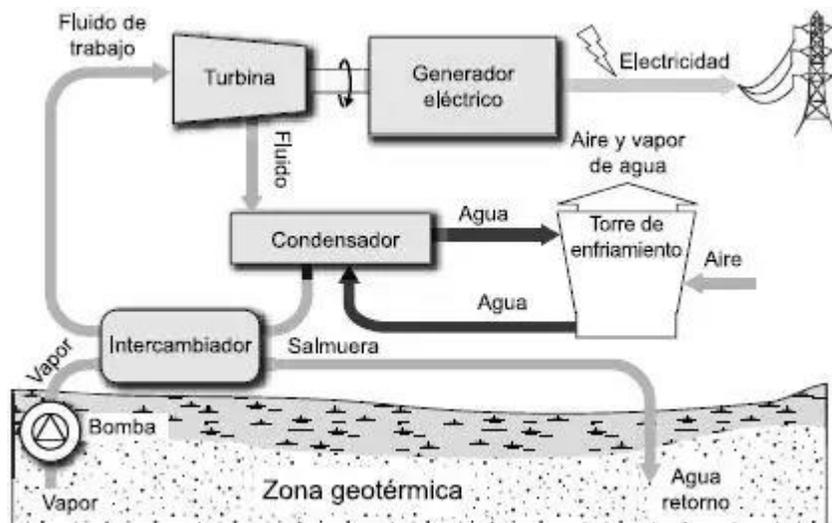


Figura 5. Esquema del ciclo binario

Estos sistemas, además de presentar la ventaja de permitir utilizar yacimientos geotérmicos de temperaturas medias, admiten la explotación de yacimientos con acuíferos con un mayor porcentaje de impurezas, especialmente si estos están bajo una presión tal que no tenga lugar la evaporación súbita. El líquido extraído del acuífero, una vez ha cedido su calor al fluido de trabajo en el intercambiador de calor, retorna de nuevo al yacimiento. El fluido secundario trabaja de acuerdo con el ciclo convencional Rankine. El fluido de trabajo, transformado en vapor recalentado a su paso por el evaporador, se dirige a la turbina con el objeto de accionarla. El generador, mecánicamente acoplado a la turbina, es el encargado de generar electricidad. Los gases del fluido de trabajo, una vez se expanden en la turbina, se condensan en un intercambiador de calor. El intercambiador es refrigerado con agua mediante un circuito que dispone de refrigeración.

Las plantas de ciclo binario se construyen generalmente en unidades modulares de pequeño tamaño, las cuales pueden ser interconectadas para constituir plantas eléctricas de decenas de megavatios. En los años 1990 se desarrolló un nuevo ciclo de trabajo, denominado ciclo Kalina, el cual es más eficiente que los ciclos convencionales de Rankine, pero de un diseño más complejo. Este ciclo utiliza como fluido secundario una mezcla de agua y amoníaco, el cual se expande (en condiciones de sobrecalentamiento) a través de las turbinas de alta presión y después es recalentado antes de accionar las turbinas de baja presión.

Los sistemas binarios más comunes son:

4.3.2. BRINE BOTTOMING SYSTEM (BBB)

Consiste en una planta a condensación y un ciclo binario acoplado en la línea de reinyección. Ver Figura 6.

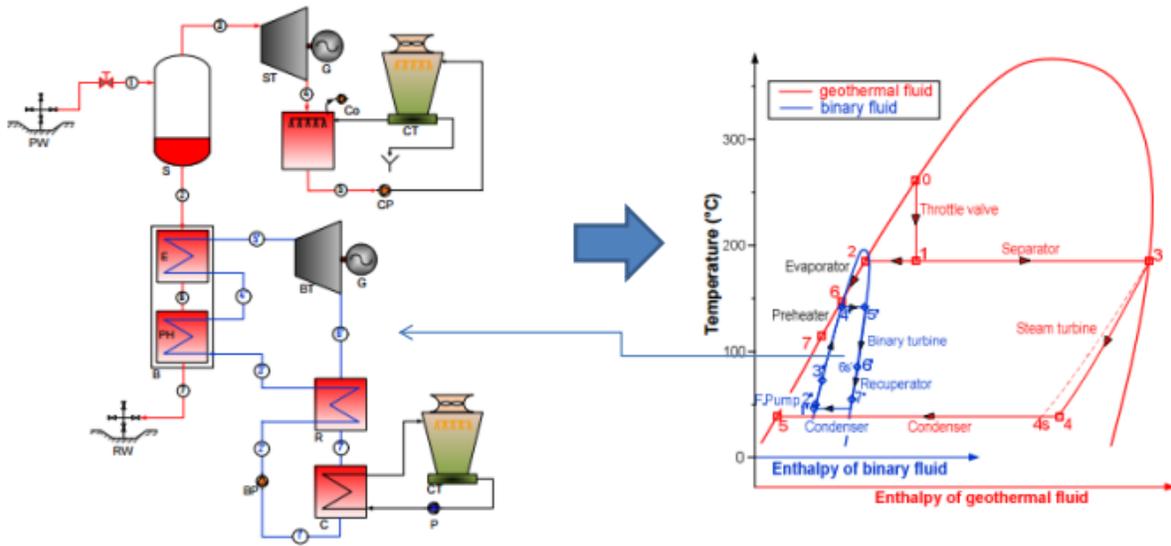
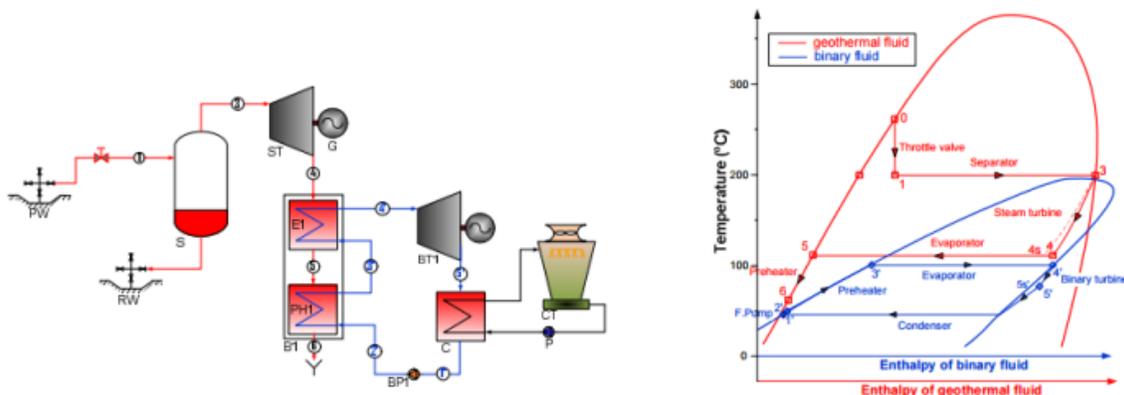


Figura 6. Sistema binario Brine Bottoming System (BBB)

Un ejemplo de este sistema es el Campo Geotérmico de Berlín en El Salvador. Se usa principalmente en sistemas de líquido dominantes, implica un mayor coste que un segundo flasheo y su operación y mantenimiento también es más complejo. El autoconsumo en estos sistemas es de 14 y 16% de su potencia eléctrica bruta.

4.3.3. SPENT STEAM BOTTOMING BINARY (SSBB)

Consiste en una planta a contrapresión y un ciclo binario acoplado en la reinyección. Ver Figura 7. Generalmente se utiliza esta configuración en campos donde existe una gran cantidad de gases no condensables (GNC) y poca cantidad de agua, tiene menor eficiencia que el bottoming y requiere un control más preciso dado en los intercambiadores de calor se da un proceso de condensación de vapor (dos fases), puede producir vibraciones.



Esquema simplificado del proceso.

Diagrama Entalpía -temperatura.

Figura 7. Sistema binario tipo: Spent Steam Bottoming Binary (SSBB).

4.3.4. SISTEMA HÍBRIDO: COMBINACIÓN DE “BBB” Y “SSBB”

Una de las ventajas de estos sistemas es la alta eficiencia de utilización, ya que aprovecha el vapor seco y la temperatura del agua. Ver Figura 8.

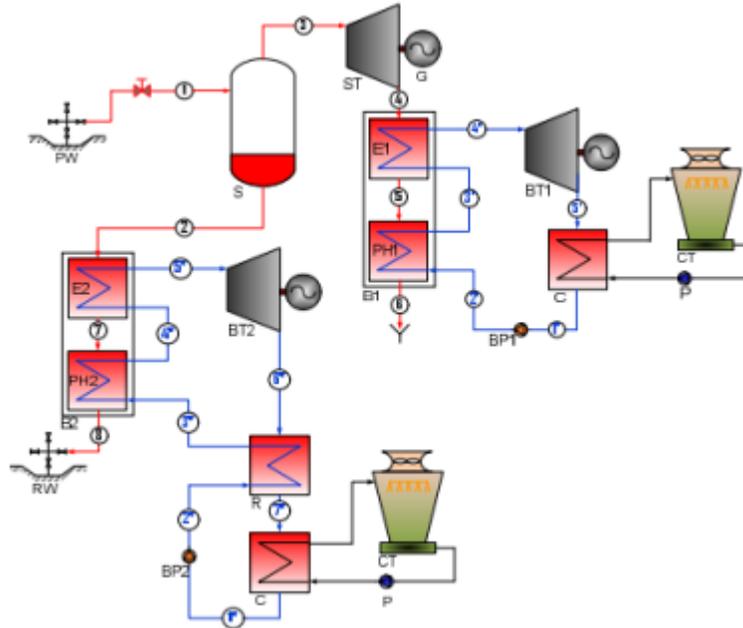
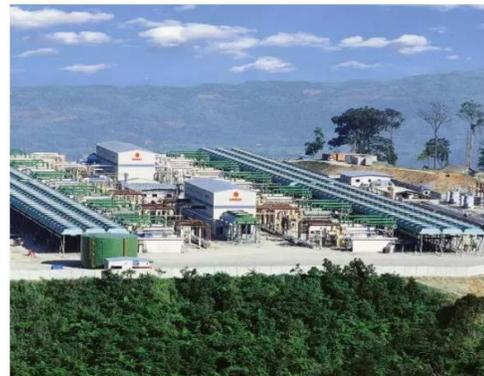


Figura 8. Sistema binario tipo híbrido

Ejemplos de plantas híbridas binarias en el mundo:

Upper Mahiao Binary GEPP: se ubica dentro del área geotérmica de Leyta en Filipinas, cuenta con una unidad y opera desde 1996, cuenta con 125 MW.



Puna Venture: en Hawaii con 30 MW ofrece el 20% de la electricidad que el archipiélago necesita. Está situada cerca de la zona East Rift del volcán Kilauea a cargo de Ormat Industries. La planta posee 5 pozos, utilizados para accionar una turbina con vapor de agua, además aprovecha el calor residual del agua, para obtener mayor potencia utilizando pentano líquido como fluido de trabajo.



La planta geotérmica de Mokai, propiedad de Tuaropaki Power Company en un 75% y de Mighty River Power en un 25%, siendo operada por Mercury Energy. Está localizada a 30 km aproximadamente al noreste de Taupo en Nueva Zelanda, usa el sistema de ciclo binario, fabricado por Ormat Industries.

Se construyó en 1999 con MW, para 2007 incrementó su capacidad a 110 MW.



4.3.5. FLUIDOS DE TRABAJO

Uno de los mejores fluidos de trabajo es el agua, sin embargo, no tiene un comportamiento ideal. El ciclo binario es un intento por superar algunas de las deficiencias del agua y para aproximarse al fluido de trabajo ideal mediante dos fluidos. Las características del fluido de trabajo más apropiado para los ciclos de potencia de vapor son;

1. Una temperatura crítica elevada y una presión máxima segura.
2. Baja temperatura del punto triple.
3. Una presión del condensador que no sea demasiado baja.
4. Una elevada entalpía de vaporización (h_{fg}) de manera que la transferencia de calor se aproxime a una isotérmica y no sean necesarias grandes relaciones del flujo de masa.
5. Una curva de saturación que se asemeje la U invertida.
6. Buenas características de transferencia de calor (alta conductividad térmica).
7. Otras propiedades como ser inerte, económico, de fácil consecución y no tóxico.

Ningún fluido posee todas estas características, el agua es el que más se acerca, sin embargo, no cumple las características 1,3 y 5.

Los fluidos de trabajo utilizados en los ciclos binarios, usualmente son los presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Fluidos de trabajo en ciclos binarios.

Fluido	Fórmula	Temperatura crítica (°C)	Presión Crítica (Bar)	Toxicidad	Flamabilidad
Isobutano	(CH ₃) ₃ CH	135	36.85	Baja	Muy Alta
Isopentano	C ₅ H ₁₂	187.2	33.87	Baja	Muy Alta
N-pentano	C ₅ H ₁₂	193.9	32.40	Baja	Muy Alta
Propano	C ₃ H ₈	96.6	42.36	Baja	Muy Alta
R-134a	CF ₃ -CH ₂ F	101	42.59	Baja	No flamable
Agua	H ₂ O	374.1	220.89	No tóxico	No flamable

Un factor que influye en la selección del fluido orgánico es el manejo del mismo, existen fluidos que cumplen mejor las especificaciones técnicas para el uso, sin embargo son muy inflamables y el manejo es más complicado, ejemplo de ello es el Propano.

4.4. INCRUSTACIÓN

La incrustación es el proceso en el cual material no deseado se deposita sobre la superficie, dicho proceso puede ocurrir en presencia o ausencia de un gradiente de temperatura. El tipo de incrustación presente en el sistema de intercambiador de calor es por precipitación (cristalización de sales disueltas en la superficie de transferencia). El proceso de incrustación se lleva a cabo en el siguiente orden: proceso de nucleación o tiempo de inducción, transporte, fijación y remoción y los factores que afectan la incrustación son las siguientes:

- Propiedades físicas, químicas, composición y Ph del fluido.
- Estado del fluido, en el caso del intercambiador de plantas geotérmicas de ciclo binario es agua geotérmica líquida proveniente de la separación de los pozos productores.
- Tipo y cantidades de impurezas disueltas y suspendidas, la mayor impureza presente es la sílice.
- La velocidad del fluido y el régimen de flujo (laminar o turbulento)
- Forma de transferencia de calor.
- Tipo de superficie.

La formación de depósitos de incrustación en intercambiadores de calor es la mayor causa de reducción de eficiencia y capacidad del sistema de calentamiento. Al incrementarse la energía necesaria para la operación, también se incrementan los costos al paso de los años.

En el diseño del intercambiador de calor se debe considerar un factor de incrustación, este es considerado como una resistencia a la transferencia de calor R_f , incrementando esta resistencia a la resistencia de la superficie limpia se obtiene el área requerida de transferencia, el factor de incrustación influye directamente en el coeficiente de transferencia de calor.

$$R_f = \frac{1}{U_{sucio}} - \frac{1}{U_{limpio}}$$

El mayor inconveniente de la resistencia de incrustación, es no considerar el factor tiempo ya que este podría generar mayor incrustación de la esperada.

Para entender un poco más acerca de la incrustación se ampliará más acerca del proceso, cabe mencionar que usualmente el agua utilizada para este tipo de plantas binarias es agua geotérmica proveniente de la separación de las fases agua/vapor de los pozos productores, al darse esta separación el líquido queda sobresaturado de minerales, debido a esta saturación se genera un grupo de átomos inestables, proceso denominado nucleación homogénea, estos grupos de átomos generan pequeños cristales provocados por las fluctuaciones locales en el equilibrio de la concentración de iones en las soluciones sobresaturadas. Luego los cristales crecen por adsorción de iones sobre las imperfecciones de las superficies de los cristales, con lo cual aumenta el tamaño del cristal. (Crabtree & Eslinger, 1999).

La energía necesaria para que el cristal crezca proviene de una reducción de la energía libre superficial del cristal, que disminuye rápidamente a medida que aumenta el radio, una vez superado cierto radio crítico. Esto implica que los cristales grandes tienden al continuo crecimiento de los mismos, además que los cristales pequeños se pueden disolver. Por lo tanto dado un cierto grado de sobresaturación, la formación de cualquier cristal pequeño va a favorecer el aumento del crecimiento de incrustaciones minerales. El semillero de cristales, de hecho actúa como un catalizador de la formación de incrustaciones (Crabtree & Eslinger, 1999). Ver Figura 9.

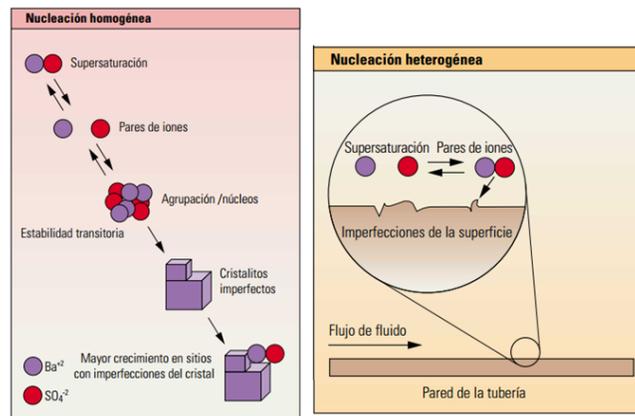


Figura 9. Nucleación homogénea y heterogénea.

La mayor parte de los tratamientos químicos se controla según la capacidad de llegada de los reactivos a la superficie de las incrustaciones. En consecuencia, la relación entre el área de la superficie y la masa, constituye un parámetro importante en la velocidad y eficiencia del proceso de eliminación.

La inhibición de la depositación de la Sílice, tiene como fundamento la disminución de la velocidad de polimerización para mantener al máximo nivel posible en forma monomérica la sílice presente, de tal manera que no ocurra formación de agrupamientos poliméricos que conduzcan a la formación de depósitos incrustantes.

5. METODOLOGÍA

Tabla 2. Metodología de trabajo del proyecto.

PROCESO	ACTIVIDAD	TAREAS	METODO/TÉCNICA APLICADA
PLANEACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> Formular propuesta de proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> Definir tema Establecer objetivos Definir el alcance Planteamiento del problema 	<ul style="list-style-type: none"> La planeación del proyecto se basa en las técnicas propias de la Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión. Tomando como referencia informes internos, y la técnica de Edward Krick para formulación de problemas.
PLANTEAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> Generar un modelo base Validar el modelo base Investigar proceso y quimismo de incrustación de agua geotérmica. 	<ul style="list-style-type: none"> Obtener información de fabricante para poder generar la modelación el equipo vaporizador Utilizar ecuaciones teóricas de leyes termodinámicas y transferencia de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizando software se caracterizará el vaporizador considerando parámetros generales para su funcionamiento (Software Engineering Equation Solver - EES) Condiciones de diseño de un fabricante en particular, se

		<ul style="list-style-type: none"> Realizar resumen de proceso de incrustación química. 	<p>introducirán al modelo base para validar su comportamiento teórico</p> <ul style="list-style-type: none"> Informes internos Realizar entrevistas con personal que ha trabajado en el tratamiento de incrustaciones en plantas geotérmicas.
DISEÑO	<ul style="list-style-type: none"> Modelación del equipo vaporizador. Conocer la razón de incrustación de sílice en un vaporizador con agua geotérmica como fluido de aporte de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> Elaboración de piezas del vaporizador: Carcasa, tubos, espejos, deflectores, tapaderas, bridas, etc. A partir de datos promedio obtenidos en plantas geotérmicas estimar la razón de incrustación de sílice. 	<ul style="list-style-type: none"> Elaboración de piezas en programa de análisis de elementos finitos, utilizando planos constructivos de fabricación. Investigación de estudios realizados previamente por personal que ha trabajado en análisis de incrustaciones de equipo.
SIMULACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> Validación del modelo recreado con el programa de análisis de elementos finitos. Establecer un valor de incrustación definida para un periodo de tiempo (t). Investigar y obtener un valor de capacidad de conductividad térmica para la incrustación de sílice de agua geotérmica. 	<ul style="list-style-type: none"> Introducir condiciones de diseño del fabricante y obtener condiciones finales para compararlas con las entregadas por el fabricante Definir el espesor de incrustación de sílice en un periodo de tiempo (t). Investigar la capacidad de conductividad térmica de la sílice. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizando un software de análisis de elementos finitos se recrearán condiciones de diseño. Informes internos Utilización de datos y gráficos recopilados con información correspondiente a incrustaciones de sílice y utilizar ecuaciones de regresión que permitan estimar una ecuación que relacione el tiempo y el espesor de depositación de sílice. Revisión de tablas y datos de elementos para obtener la conductividad térmica.
EVALUACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> Realizar comparación de los datos de diseño con los resultados de la simulación. 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluar las diferencias en las condiciones de diseño con las obtenidas a partir de la simulación. 	<ul style="list-style-type: none"> Comparar mediante porcentajes de error los datos obtenidos para determinar la validez de los mismos.
SEGUIMIENTO DEL PROYECTO	<ul style="list-style-type: none"> Controlar y monitorear de actividades 	<ul style="list-style-type: none"> Establecer actividades principales. Elaborar cronograma de seguimiento Evaluar el grado de avance del proyecto Realizar modificaciones necesarias. 	<ul style="list-style-type: none"> El control y monitoreo del proyecto se realiza tomando de base el Project Management Body of Knowledge (PMBOK) del PMI, basándose en el análisis del grado de avance real contra el proyectado, tomando en cuenta el valor ponderado de las actividades y su duración. La herramienta principal utilizada en el seguimiento del proyecto es Microsoft Project, v. 2013.

6. ANÁLISIS DE DATOS

6.1. INCRUSTACIÓN EN EL VAPORIZADOR

Cuando el agua ingresa a una caldera (generador de vapor), inevitablemente transporta sólidos disueltos, sólidos en suspensión y gases, en una magnitud que depende del tratamiento al que haya sido sometida para su acondicionamiento.

Los sólidos que contenidos en el agua resultan cada vez más concentrados, esta concentración irá incrementando hasta que supere el punto de solubilidad y el sólido empiece a “salir” de la solución. Estos sólidos en suspensión, dependiendo de la naturaleza, precipitan y se depositan sobre las superficies donde se realiza el intercambio de calor sufriendo transformaciones químicas que los conviertan en incrustaciones. Este problema puede traer varios inconvenientes tales como: corrosión, erosión, desbalance, pérdida de eficiencia, falla en los tubos de la caldera, etc.

El sílice presente en las aguas de alimentación de la caldera pueden formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio). En la Figura 10 se puede observar la corrida superior de unos tubos de humo de una caldera con incrustaciones superiores a los 8 mm.



Figura 10. Tubos de humo de caldera con incrustaciones.

La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y concentraciones de una caldera pueden soltar las incrustaciones, por lo que deben ser eliminadas de una caldera muy incrustada para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión. La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico.

Debido a las incrustaciones ocasionadas por la sílice, resulta importante conocer el valor de la conductividad térmica de esta, en forma de silicato de calcio, magnesio y sílice (SiO_2). Con este valor es posible estimar la declinación de capacidad de conductividad térmica del vaporizador y evidenciar de qué manera y a qué magnitud afecta la eficiencia del equipo. Cabe mencionar que el valor de conductividad térmica varía dependiendo de la temperatura. Conceptualmente, la conductividad térmica se puede establecer como una propiedad dependiendo del medio, que relaciona la velocidad perdida de calor por unidad de área, con la velocidad de cambio de la temperatura, como se muestra en la ecuación:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t A} = -k * \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde:

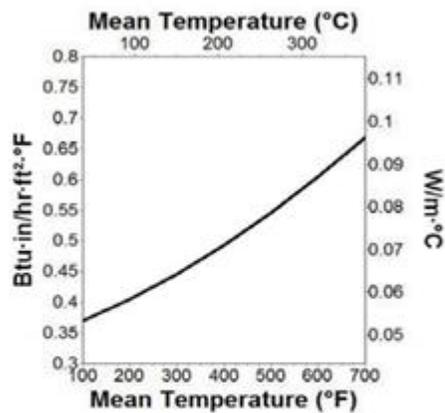
$\frac{\Delta Q}{\Delta t A}$: Corresponde a la transferencia de calor por unidad de área.

k : Es igual al valor de conductividad térmica

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$: Corresponde al gradiente de temperatura.

Conductividad térmica

En la figura 11 se puede observar el comportamiento de la conductividad térmica del silicato de calcio con respecto a la temperatura, para poder estimar un valor medio para el estudio y evaluación del modelo a realizarse.



Temperatura Media	°F	100	200	300	400	500	600	700
	°C	38	93	149	204	260	316	371
	Btu · in/(hr · ft² · °F)	.37	.41	.45	.49	.55	.60	.67
	W/m · °C	.053	.058	.064	.071	.079	.087	.096

Figura 11. Comportamiento de conductividad térmica.

Las temperaturas que se manejan en el vaporizador rondan los 180°C por lo que se puede tomar como referencia esta temperatura para estimar el valor de conductividad térmica para el caso de estudio, en la tabla 3 se observan diferentes valores de conductividad térmica para algunos compuestos cerámicos entre ellos la sílice (SiO₂).

Tabla 3. Propiedades térmicas de los materiales.

PROPIEDADES TÉRMICAS	
Material	Conductividad térmica
Cerámico	k (W/mK)
Alumina (Al ₂ O ₃)	30.1
Óxido de berilio (BeO)	220
Magnesia (MgO)	37.7
Espinela (MgAl ₂ O ₄)	15
Sílice (SiO ₂)	2
Vidrio de sosa y cal	1.7

Tabla 4. Estadísticas de Incrustación.

Año	Incrustación
2009	0.998
2010	0.929
2011	0.575
2012	0.317
2013	0.308
2014	0.300
2015	0.500
2016	0.700

Una vez teniendo una estimación del valor de conductividad térmica se procede a estimar la cantidad de incrustación de sílice que es posible encontrar en un vaporizador que trabaje con agua geotérmica de esta forma con estos dos valores es posible encontrar la capacidad de intercambio de calor y cómo éste afecta sobre el funcionamiento del equipo.

Para el caso se han tomado nota de los estudios realizados durante diferentes años del comportamiento de la incrustación y la medición del espesor de pared que genera la depositación e incrustación de sílice sobre el vaporizador en una planta de ciclo binario en el gráfico 1 se puede observar el comportamiento de la depositación a los largo de los años.

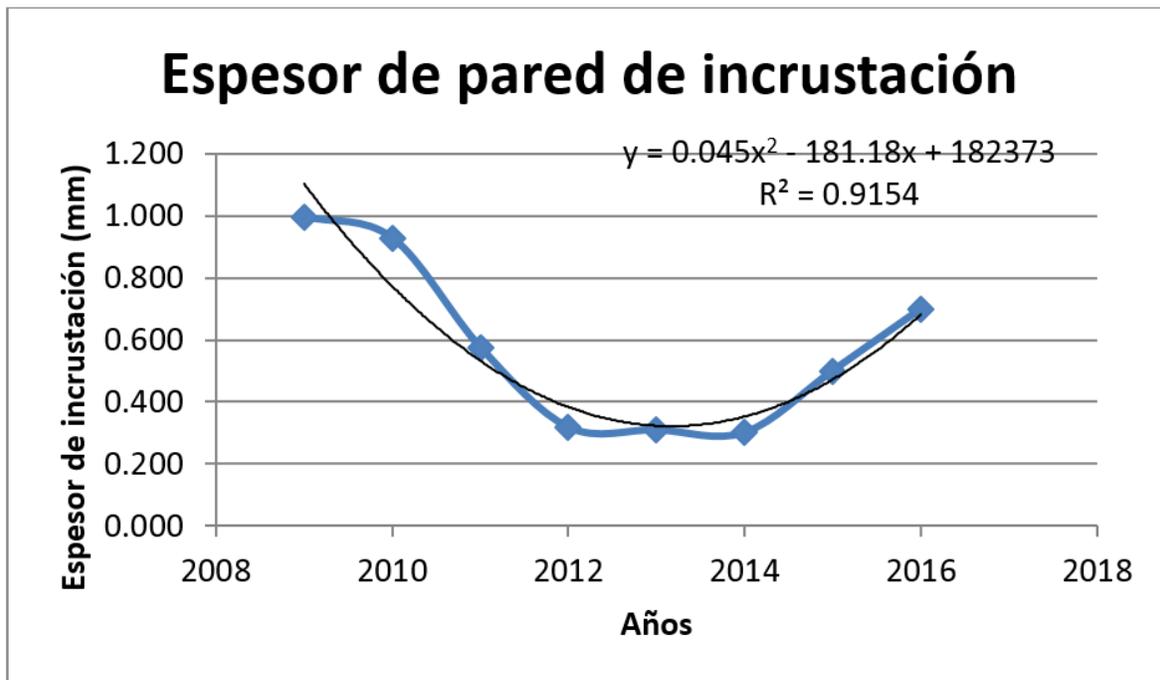


Gráfico 1. Tendencia de la incrustación en el tiempo.

En el gráfico anterior se puede observar una tendencia de parábola referente al comportamiento de pared de sílice depositada en los tubos del intercambiador. Este comportamiento demuestra que se ha tenido un aumento de la cantidad de sílice que se ha encontrado a partir del año 2014.

Esto puede ser debido a diferentes factores entre ellos la capacidad de inhibición y el sistema utilizado para reducir la cantidad de depositación.

Los datos obtenidos son datos puntuales que se han analizado cada vez que se realiza un mantenimiento y limpieza del equipo vaporizador donde es posible observar el comportamiento y el estado del vaporizador referente a la incrustación de sílice.

6.2. MÉTODO P-NTU_t PARA DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD TÉRMICA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

El método P-NTU_t representa una variación del método ε-NTU; el origen de este método está relacionado con intercambiadores de calor de tipo carcasa y tubos.

Con el fin de evitar posibles errores relacionados con el método ε-NTU, la variación P-NTU_t propone la alternativa de presentar la efectividad de la temperatura, P, del lado del fluido considerado como una función de NTU, la razón de la capacidad calorífica R y el arreglo de los flujos.

$$P = \Phi(NTU_t, R, \text{arreglo de flujos})$$

Donde P, NTU_t y R se definen para el lado tubo independiente de si por ellos pasa el fluido caliente o el frío.

En este método el calor total transferido del fluido caliente al frío es expresado por:

$$q = PC_t(T_1 - t_1)$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (\text{P corresponde al lado tubo})$$

donde t₁ y t₂ son temperaturas de entrada y salida referidas al lado tubo y T₁ y T₂ corresponden a las temperaturas de entrada y salida del lado carcasa.

La razón de capacidad calorífica R, es la relación en términos de descenso/ incremento de temperatura en el fluido del lado carcasa y el incremento/descenso de temperatura del fluido de lado tubo, lo anterior se representa en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{C_t}{C_s} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

Relacionando R con C (Razón de capacidad calorífica en el método ε-NTU):

$$R = \frac{C_t}{C_s} = C \quad \text{para } C_t = C_{\text{mín}}$$

$$R = \frac{1}{C} \quad \text{para } C_t = C_{\text{máx}}$$

Así, R es siempre mayor o igual a C.

El Número de Unidades de Transferencia NTU_t para un intercambiador de calor de carcasa y tubos es definido como la razón de conductancia total del fluido en el lado tubo y la capacidad calorífica en el mismo lado.

$$NTU_t = \frac{UA}{C_t}$$

Esta NTU_t se relaciona con NTU mediante la capacidad calorífica mínima de los fluidos de la siguiente manera:

$$NTU_t = NTU \frac{C_{\text{mín}}}{C_t} = NTU \quad \text{para } C_t = C_{\text{mín}}$$

$$NTU_t = NTU \cdot C \quad \text{para } C_t = C_{\text{mín}}$$

Así NTU_t es siempre menor o igual que NTU.

La efectividad del intercambiador es función de las NTU, las capacidades caloríficas de los fluidos y el arreglo de los mismos, como se observa en la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \Phi(NTU, C_t, C_s, \text{arreglo de flujos})$$

Haciendo uso del software de resolución de ecuaciones EES, el método P- NTU_t y las condiciones de diseño que se presentan en la Tabla 5, se caracteriza el modelo del vaporizador.

Tabla 5. Condiciones iniciales de diseño de vaporizador.

Condiciones de Diseño de un vaporizador tipo Kettle				
Área efectiva [m ²]	1,645			
Coefficiente de transferencia de calor U [kW/m ² -K]	1.282			
Ubicación del Fluido	Lado Carcasa		Lado Tubo	
Tipo de Fluido	Isopentano		Agua geotérmica	
Flujo másico [kg/s]	91.2		221	
Temperatura (Ent/Sal) [C]	159.6	161.2	180	163.8
Calor específico (Ent/Sal) [kJ/kg-K]	4.172	3.149	4.403	4.347
Presión de entrada [kPa]	2,267.68		2,199.92	
Velocidad (salida) [m/s]	0.35		1.11	
Calor total transferido [kW]	15,680			

6.3 MODELADO 3D DE VAPORIZADOR EN SOFTWARE DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

Partiendo de los datos proporcionados en la Tabla 5 y de planos constructivos del fabricante, se procedió al realizar el modelado de los componentes del vaporizador. En la Figura 12 se presenta una vista esquemática del vaporizador.

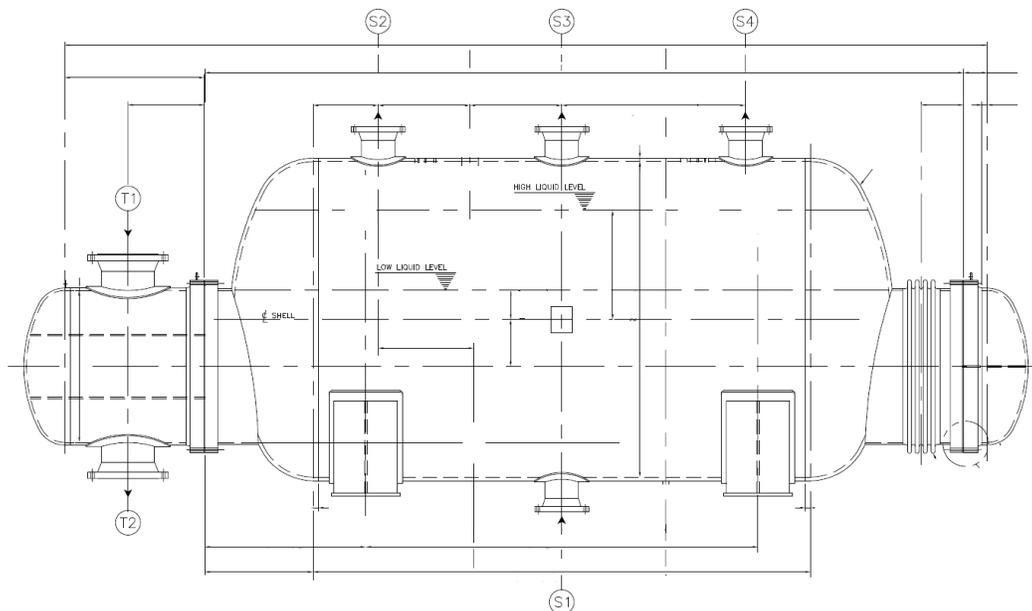


Figura 12. Vista esquemática del vaporizador.

Se inició con el modelado de las piezas principales que componen al vaporizador, primeramente esta clase de equipos están compuestos de una carcasa y un arreglo de tubos paralelo al eje longitudinal de la carcasa, para soportar los tubos en el interior del vaporizador es necesario el uso de elementos llamados deflectores los cuales se encargan de soportar los tubos y distribuir el flujo que circula por la carcasa.

El diseño de este vaporizador es de tipo fijo, es decir, los tubos tienen los extremos fijos a la carcasa y necesitan de un elemento llamado junta de expansión debido a la expansión diferencial que sufren los materiales que conforman el intercambiador.

A continuación se describen brevemente los componentes principales de un intercambiador de calor de tipo carcasa y tubos:

Tubos: Elementos que proporcionan una superficie de calor entre los fluidos involucrados en el proceso, los mismos pueden poseer aletas con las cuales se proporciona una mayor área de transferencia de calor.

Espejo o Placa de tubos: generalmente es una placa que ha sido perforada y acondicionada para soportar los tubos, los sellos, la acción corrosiva de ambos fluidos.

Carcasa: es el compartimiento para el fluido externo, para el caso del vaporizador, la distribución de los tubos solo utilizan una sección de la carcasa de menor diámetro, con el fin de dejar un espacio para la fase de vapor.

Deflectores: ubicados de manera transversal permiten soportar los tubos evitando las vibraciones y el pandeo.

En las Figuras 13, 14 y 15 se muestran los elementos modelados en el software de análisis de elementos finitos.

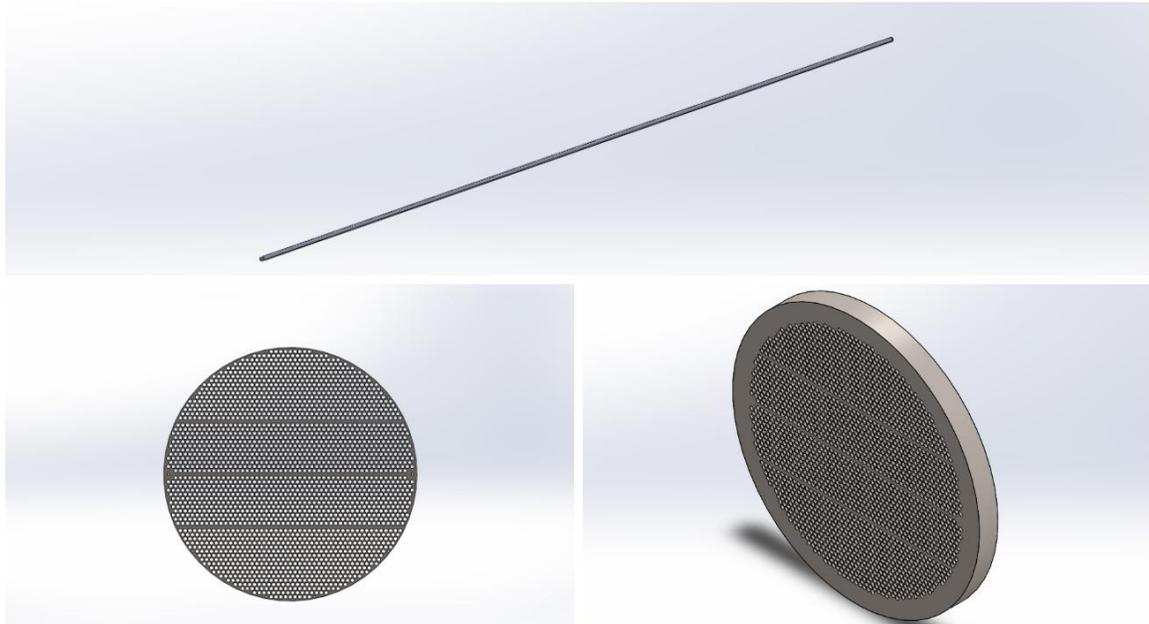


Figura 13. Elementos: (a) Tubos, (b) Deflectores y (c) Espejo.

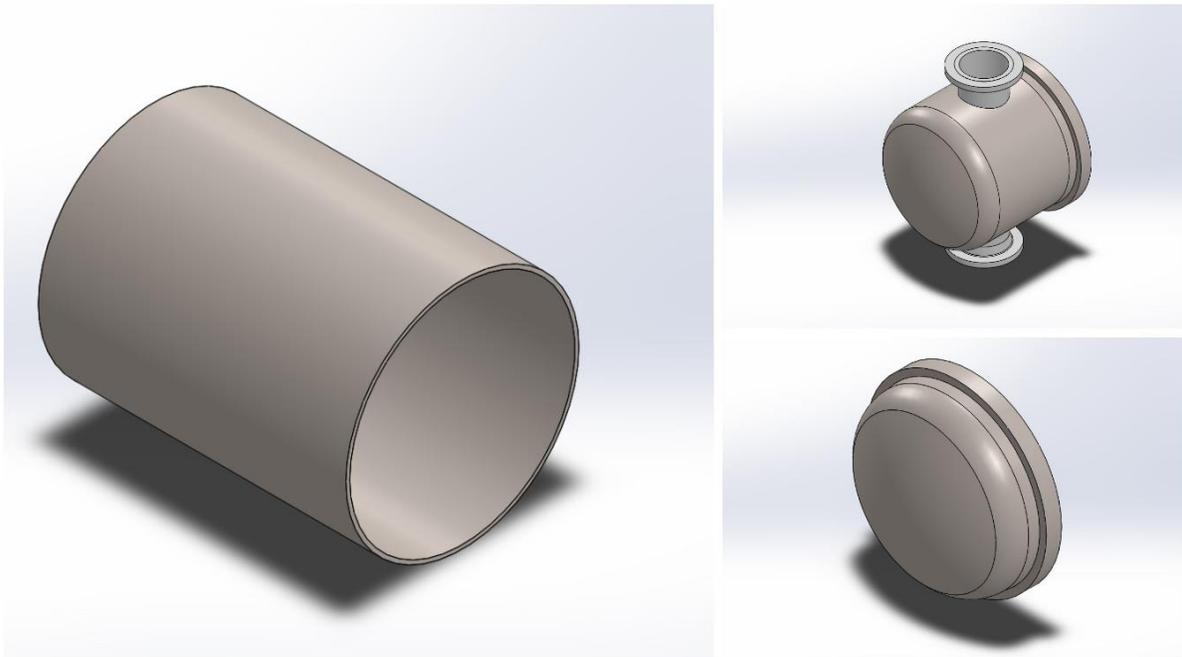


Figura 14. Elementos: (a) Carcasa, (b) Tapa lado agua y (c) Tapa trasera

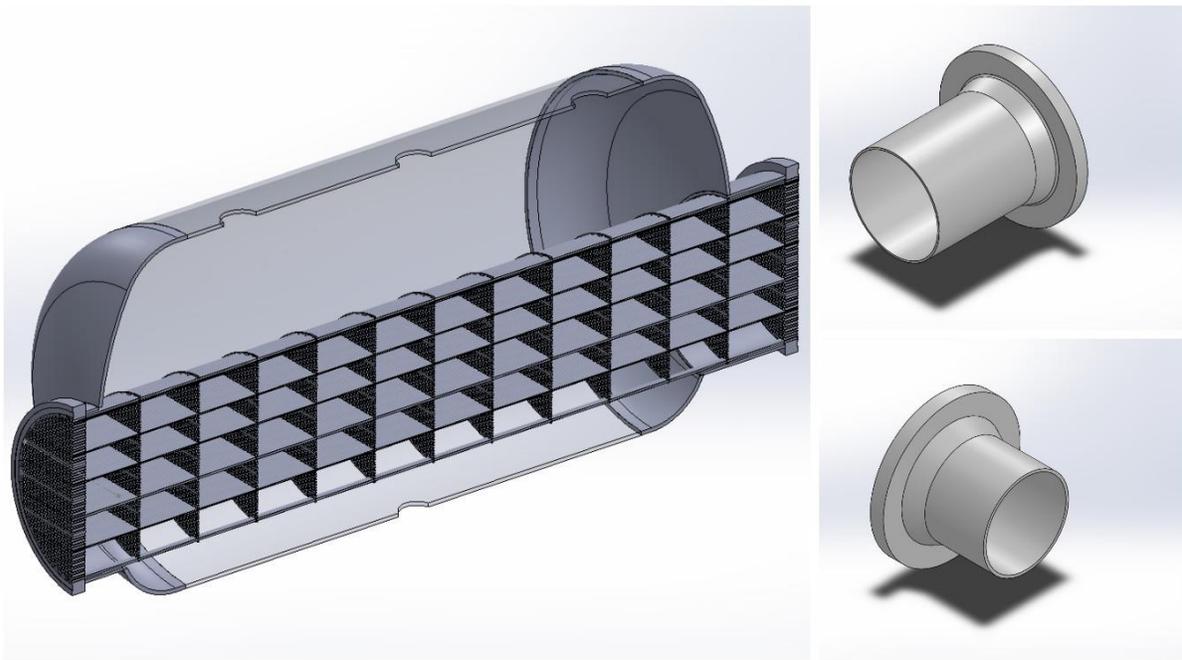


Figura 15. Elementos: (a) Vista en corte de ensamble de piezas, (b) Boquilla lado agua y (c) Boquilla lado isopentano

En la Figura 16 se muestra el ensamble completo de las partes que conforman el vaporizador.

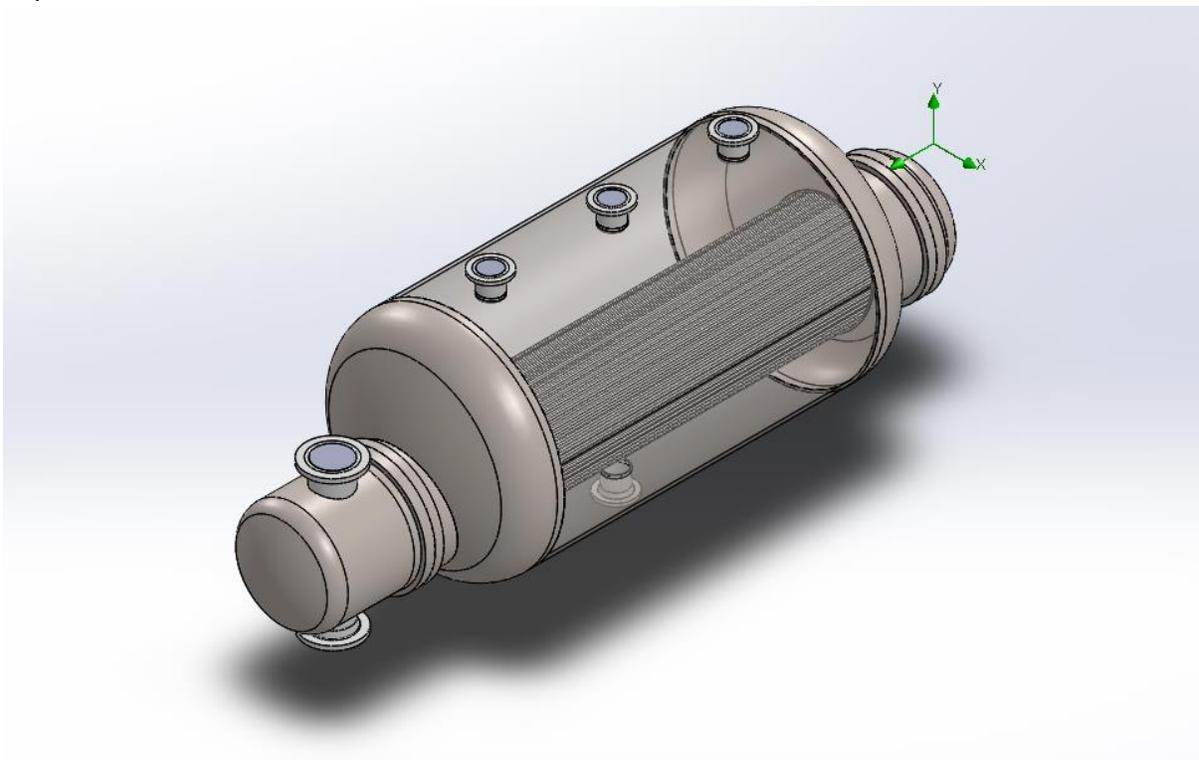


Figura 16. Ensamble de elementos del vaporizador.

7. RESULTADOS

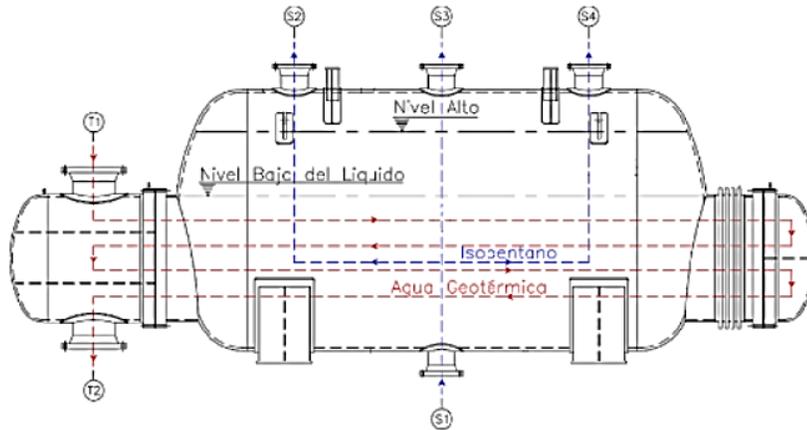
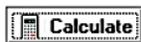
7.1 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN CON EES.

Utilizando el software de resolución de ecuaciones EES se resolvieron las ecuaciones correspondientes al método P-NTU_t, asignando para ello las condiciones de diseño del fabricante.

Conociendo que el fluido caliente se conduce por los tubos y el fluido frío por la carcasa, se utiliza la siguiente nomenclatura:

- Subíndice “c” para fluido frío.
- Subíndice “h” para fluido caliente.
- Subíndices 1 y 2 para determinar entradas y salidas respectivamente.

El resultado se presenta en la Figura 17



VAPORIZADOR

$$C_{p,c1} = 4.172 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$C_{p,c2} = 3.149 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$\dot{m}_c = 91.2 \text{ [kg/s]}$$

$$\dot{C}_c = 333.8 \text{ [kW/K]}$$

$$\dot{C}_h = 966.9 \text{ [kW/K]}$$

$$C = 0.3453 \text{ [-]}$$

$$C_{p,h1} = 4.403 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$C_{p,h2} = 4.347 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$\dot{m}_h = 221 \text{ [kg/s]}$$

$$T_1 = 180 \text{ [C]}$$

$$T_2 = 163.8 \text{ [C]}$$

$$S_1 = 159.6 \text{ [C]}$$

$$A = 1645 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$U = 1.282 \text{ [kW/m}^2\text{-K]}$$

$$P = 0.7941 \text{ [-]}$$

$$q = -15663 \text{ [kW]}$$

$$R = 2.896 \text{ [-]}$$

$$NTU_t = 2.181 \text{ [-]}$$

$$NTU_c = 6.317 \text{ [-]}$$

$$\epsilon = 0.8313 \text{ [-]}$$

Figura 17. Resultados caracterización de vaporizador con EES.

Para determinar el porcentaje de error entre el modelo y las condiciones de diseño, se compara el resultado de la transferencia de calor total del fluido caliente hacia el fluido frío mediante las siguientes ecuaciones:

$$\%Error_{\text{modeloEES}} = \left| \frac{q_{\text{diseño}} - q_{\text{modeloEES}}}{q_{\text{diseño}}} \right| * 100$$

$$\%Error_{\text{modeloEES}} = \left| \frac{15680 \text{ kW} - 15663 \text{ kW}}{15680 \text{ kW}} \right| * 100 = 0.11$$

Del resultado anterior se determina un 0.11% de error en el modelo caracterizado con EES por lo que se demuestra la confiabilidad del mismo.

7.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CONDICIONES DE DISEÑO EN SOFTWARE DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

A partir del modelo geométrico desarrollado en el software de análisis de elementos finitos y con las condiciones de diseño de la Tabla 5, se establecieron condiciones de frontera para la simulación del comportamiento de los fluidos.

7.2.1 LADO TUBO.

Para el lado tubo, por donde circula el fluido caliente, se simularon las condiciones de diseño para poder determinar velocidad del flujo de agua a la salida del vaporizador, distribución de temperaturas y transferencia de calor en el vaporizador.

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos con la simulación del modelo utilizando el software de análisis de elementos finitos.

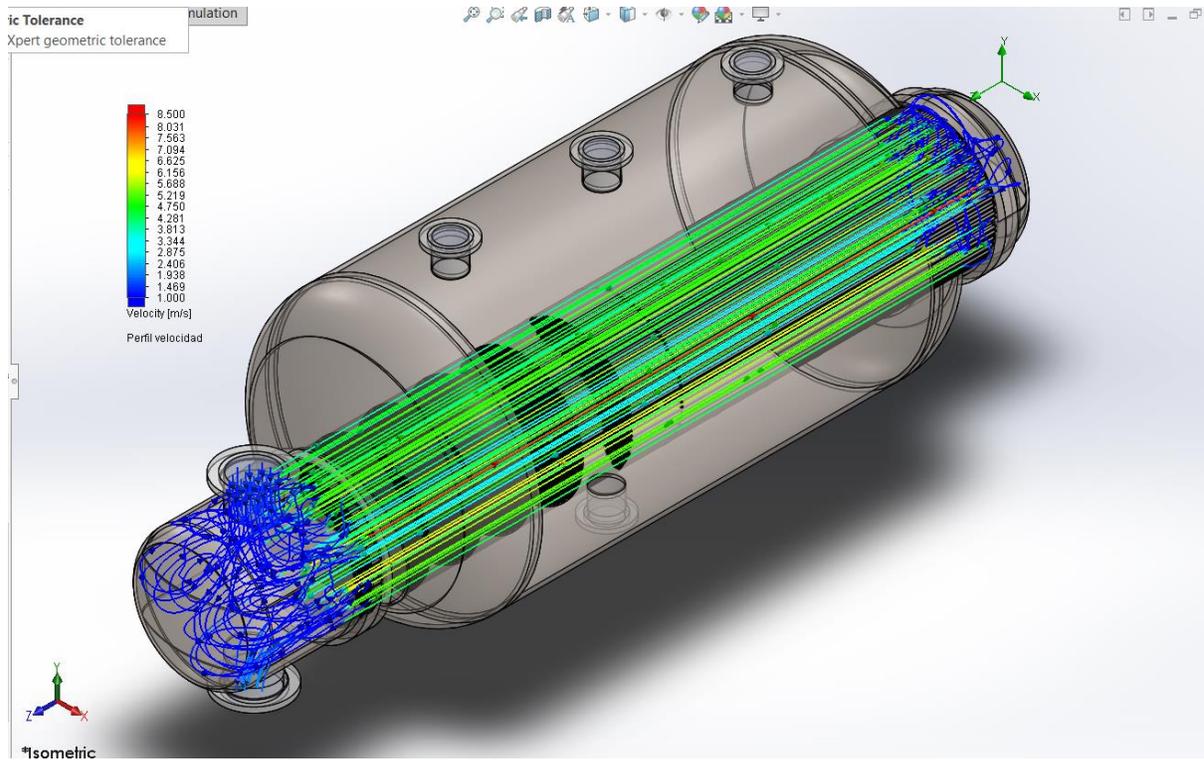


Figura 18. Resultado de simulación de velocidad del fluido en el lado tubo, vista isométrica.

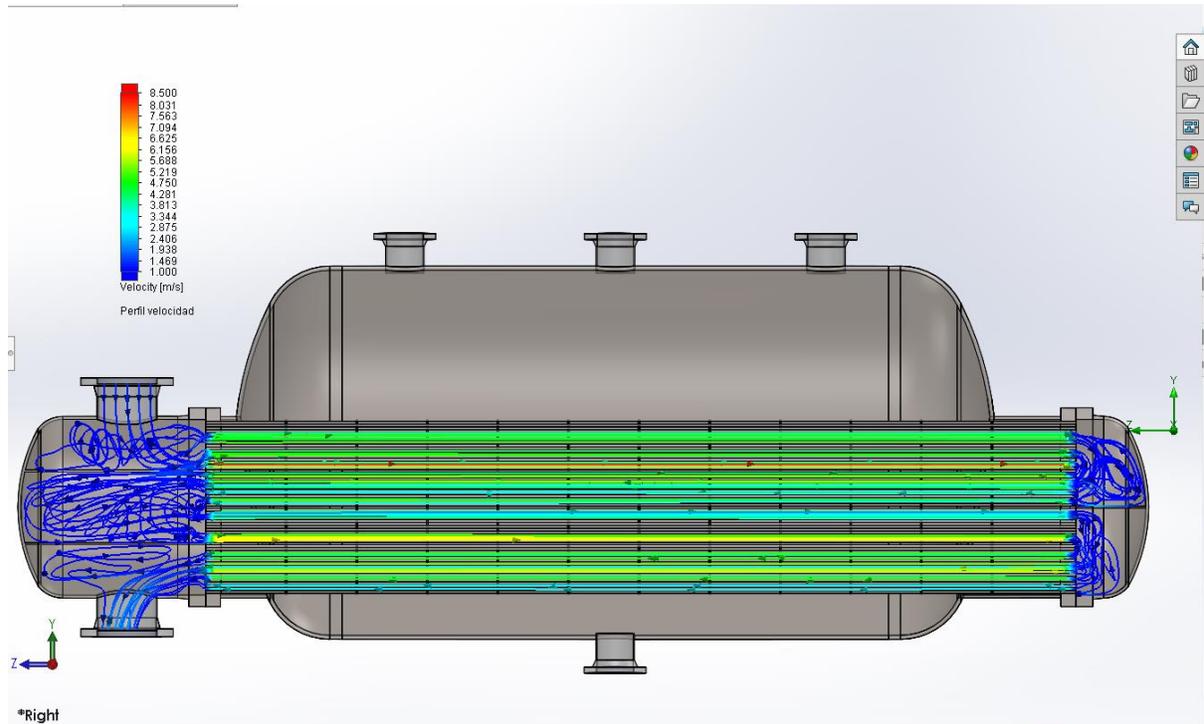


Figura 19. Resultado de simulación de velocidad del fluido en el lado tubo, vista lateral derecha.

Se observa en las Figuras 18 y 19 que la velocidad de salida de flujo en el lado tubo tiene un valor de 1.00 m/s.

Para determinar el porcentaje de error entre la simulación y las condiciones de diseño, se compara el resultado de la velocidad de salida del lado tubo mediante la siguiente ecuación:

$$\%Error(v_{sal})_{simulación} = \left| \frac{v_{diseño} - v_{simulación}}{v_{diseño}} \right| * 100$$

$$\%Error(v_{sal})_{simulación} = \left| \frac{1.11 \text{ m/s} - 1.00 \text{ m/s}}{1.11 \text{ m/s}} \right| * 100 = 9.9\%$$

Del resultado anterior se determina un error de 9.9% en la simulación del modelo base, lo cual permite una confiabilidad en el modelo de aproximadamente el 90%.

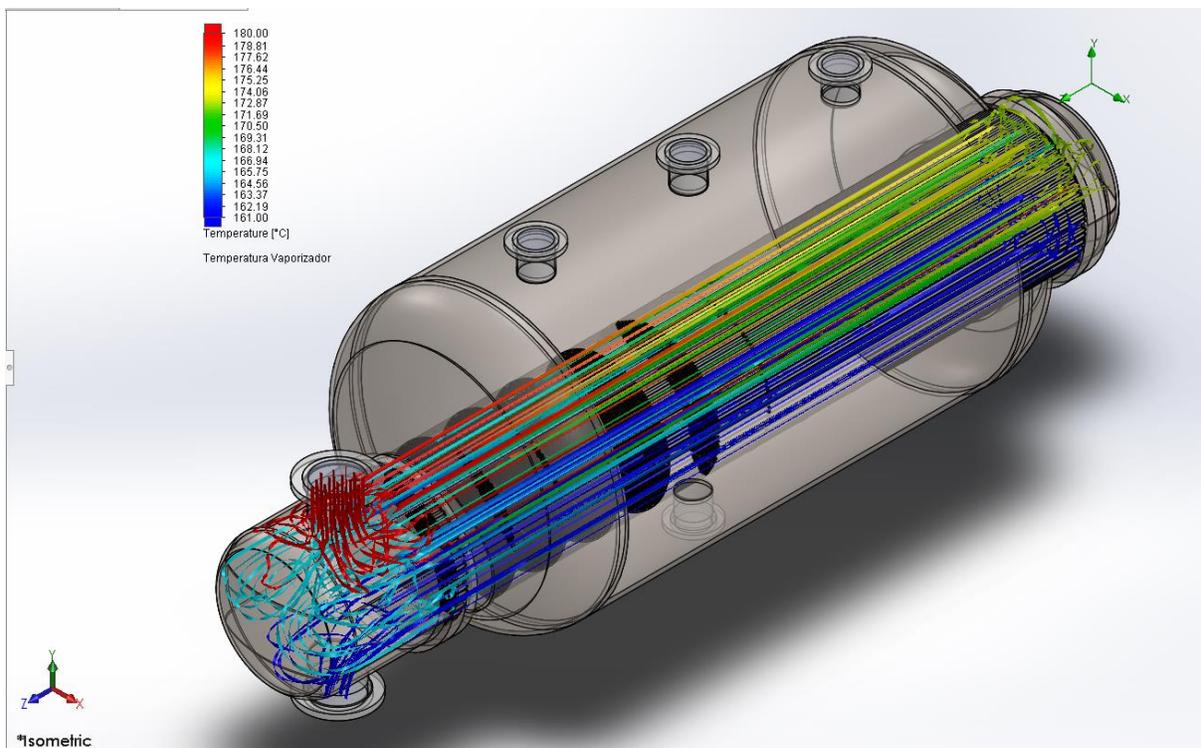


Figura 20. Resultado de simulación de distribución de temperatura en el lado tubo, vista isométrica.

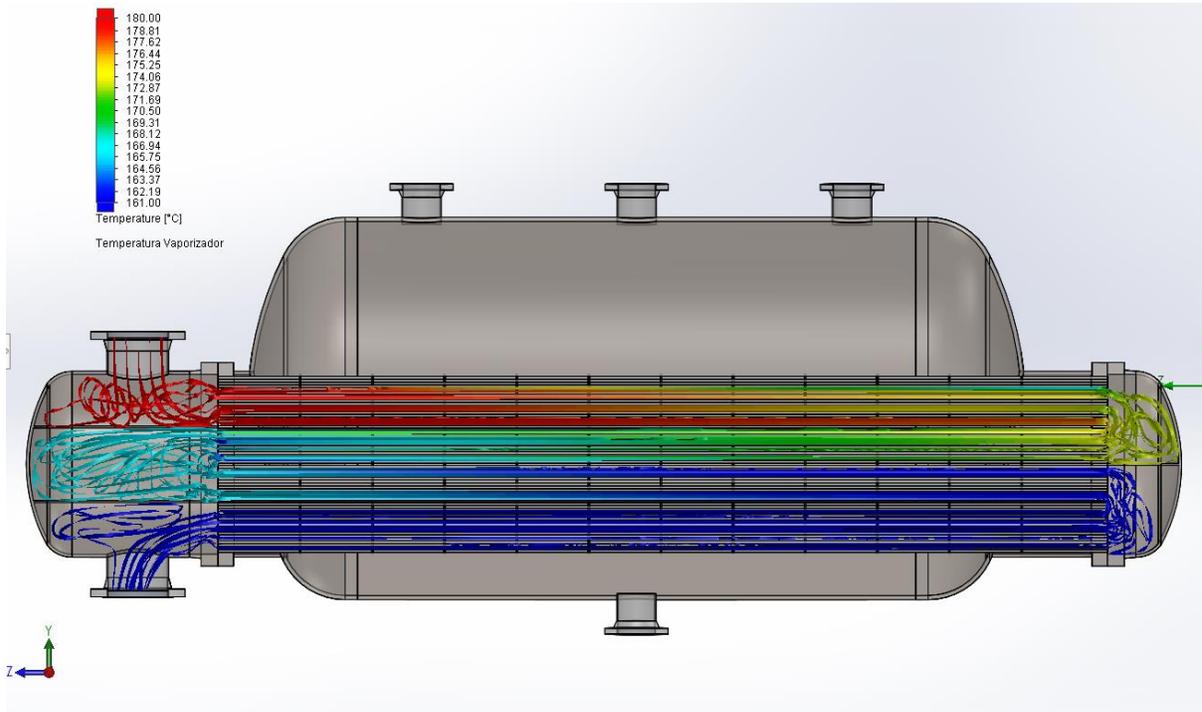


Figura 21. Resultado de simulación de distribución de temperatura en el lado tubo, vista lateral derecha.

En las Figuras 20 y 21, se observa la distribución de temperaturas en el lado tubo para los 4 pasos del fluido por los tubos. La temperatura a la salida según la simulación posee un valor de 161 C.

Para determinar el porcentaje de error entre la simulación y las condiciones de diseño, se compara el resultado de la temperatura de salida del fluido mediante la siguiente ecuación:

$$\%Error(t_{sal})_{simulación} = \left| \frac{t_{diseño} - t_{simulación}}{t_{diseño}} \right| * 100$$

$$\%Error(t_{sal})_{simulación} = \left| \frac{163.8\text{ C} - 161\text{ C}}{163.8} \right| * 100 = 1.7\%$$

Del resultado anterior se determina un error del 1.7%, lo cual representa una alta confiabilidad en la simulación del modelo.

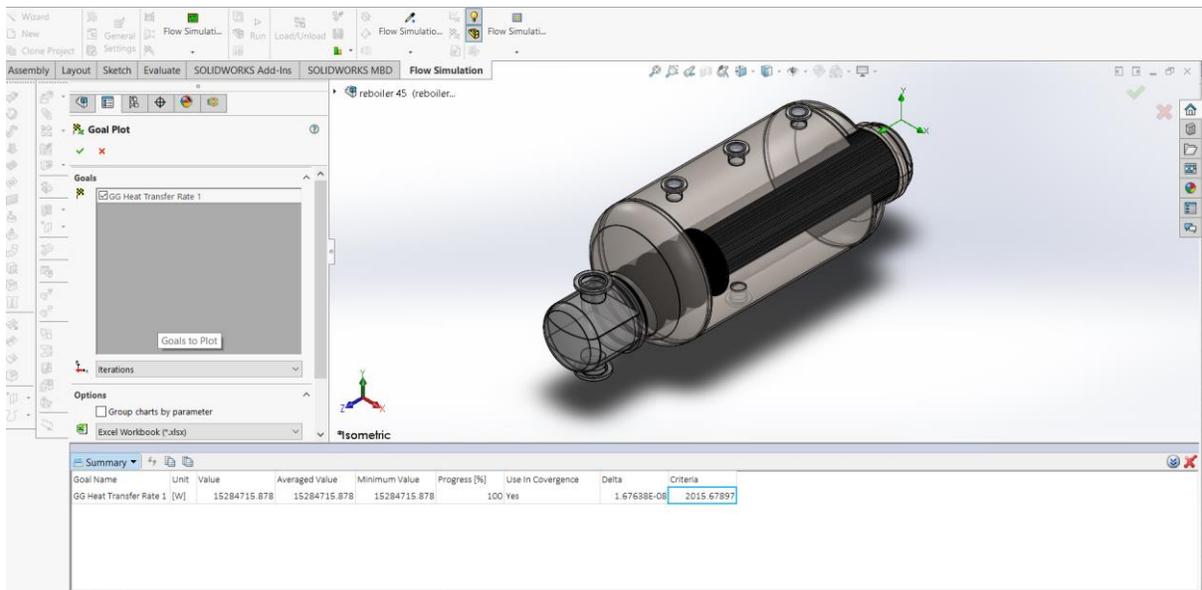


Figura 22. Resultado de simulación de transferencia de calor en el lado tubo.

Se observa en la Figura 22 que la transferencia de calor total en el lado tubo tiene un valor de 15284715.878 W \approx 15285 kW.

Para determinar el porcentaje de error entre la simulación y las condiciones de diseño, se compara el resultado de la transferencia de calor total mediante la siguiente ecuación:

$$\%Error(q)_{simulación} = \left| \frac{q_{diseño} - q_{simulación}}{q_{diseño}} \right| * 100$$

$$\%Error_{modeloEES} = \left| \frac{15680kW - 15285kW}{15680kW} \right| * 100 = 2.5\%$$

Del resultado anterior se determina un error del 2.5% en la simulación del modelo base, al compararlo con la caracterización realizada en EES, se observa que el calor total transferido presenta coherencia con los datos de diseño.

7.2.2 LADO CARCASA.

Para el lado carcasa, por donde circula el fluido frío, se asumió que el fluido era vapor y se simularon las condiciones de diseño para poder determinar velocidad del flujo a la salida del vaporizador y presión.

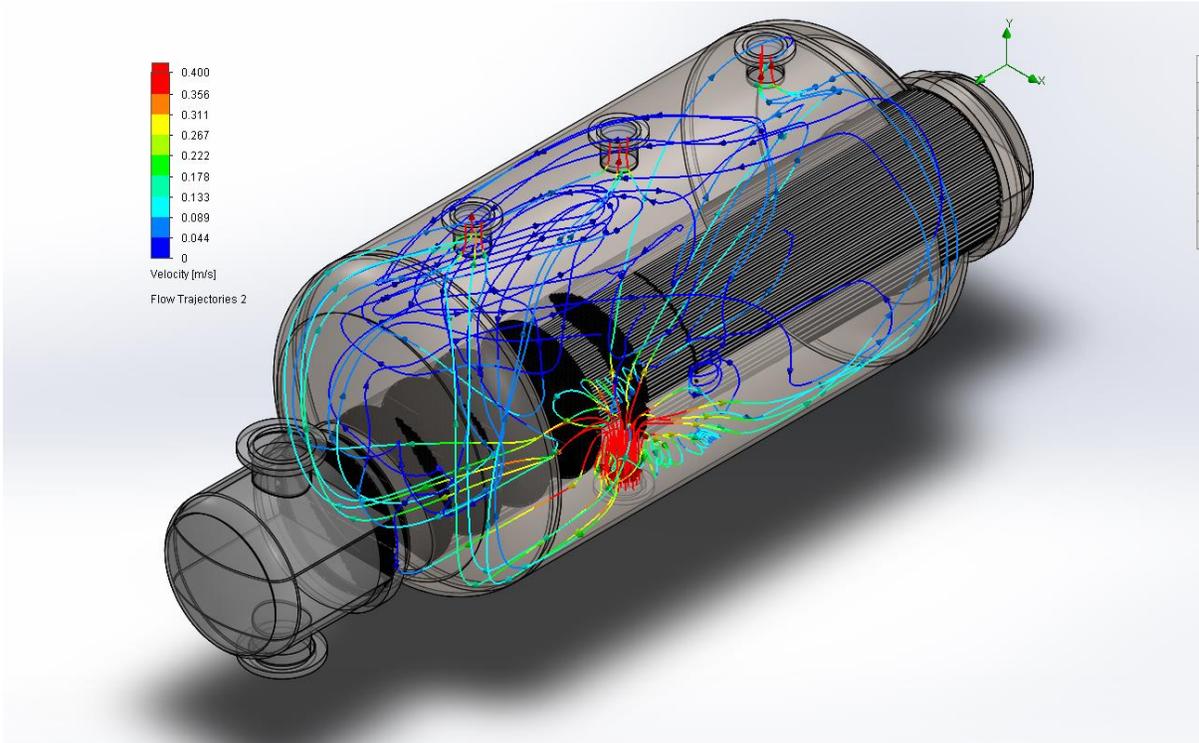


Figura 23. Resultado de simulación de velocidad de fluido en el lado carcasa, vista isométrica.

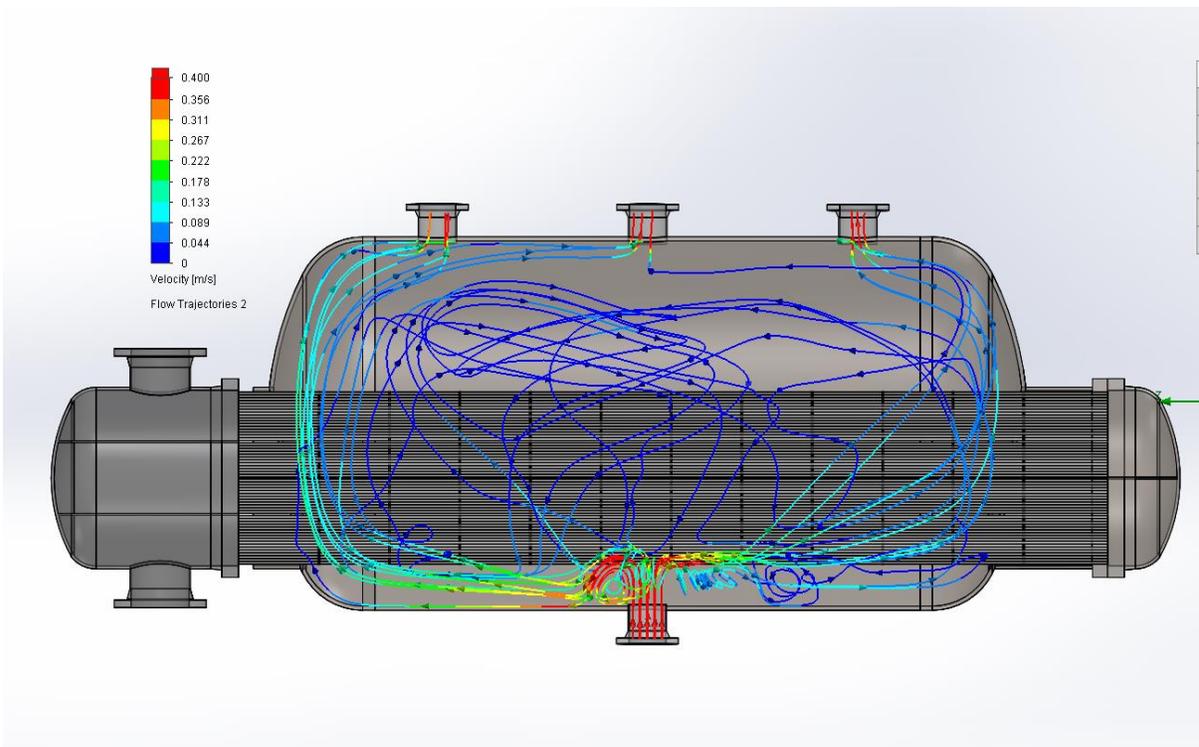


Figura 24. Resultado de simulación de velocidad de fluido en el lado carcasa, vista lateral derecha.

En las Figuras 23 y 24, se observa que la velocidad de salida de fluido en el lado carcasa tiene un valor de 0.356 m/s.

Para determinar el porcentaje de error entre la simulación y las condiciones de diseño, se compara el resultado de la velocidad de salida del fluido mediante la siguiente ecuación:

$$\%Error(v_{sal})_{simulación} = \left| \frac{v_{diseño} - v_{simulación}}{v_{diseño}} \right| * 100$$

$$\%Error(v_{sal})_{simulación} = \left| \frac{0.35 \text{ m/s} - 0.356 \text{ m/s}}{0.35 \text{ m/s}} \right| * 100 = 1.7\%$$

Del resultado anterior se determina un error del 1.7%, lo cual es un resultado satisfactorio para validar el modelo base.

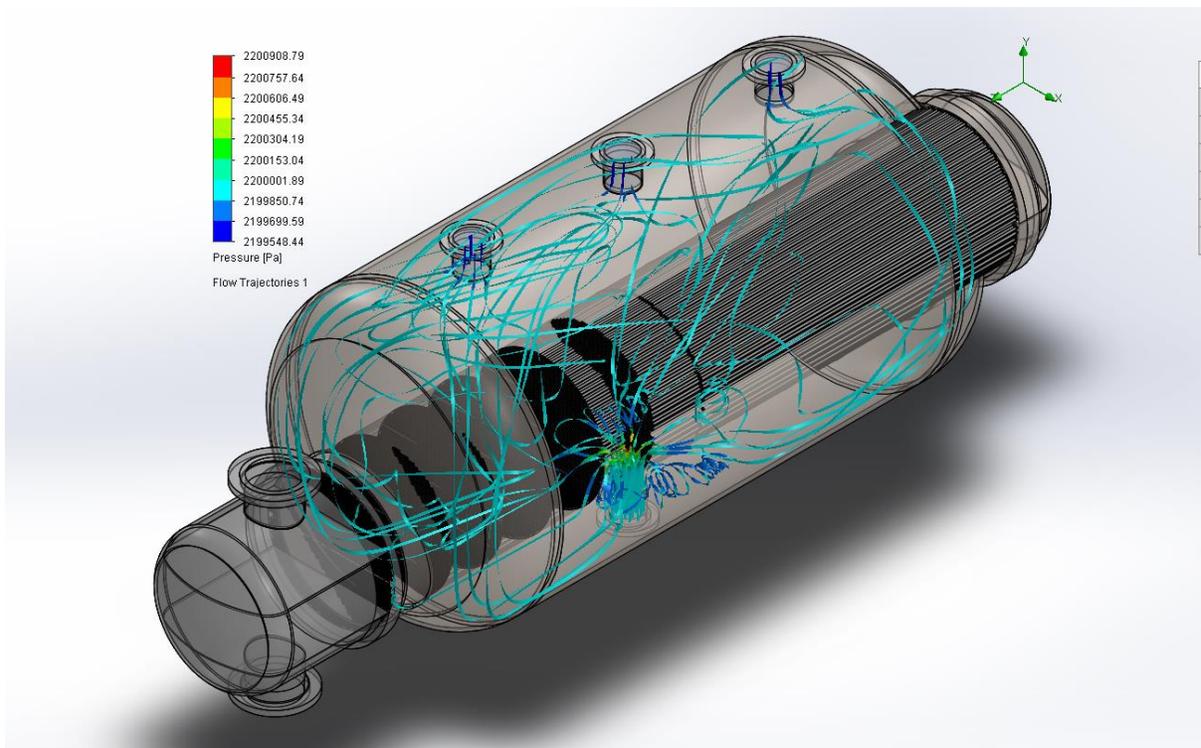


Figura 25. Resultado de simulación de presión en el lado carcasa, vista isométrica.

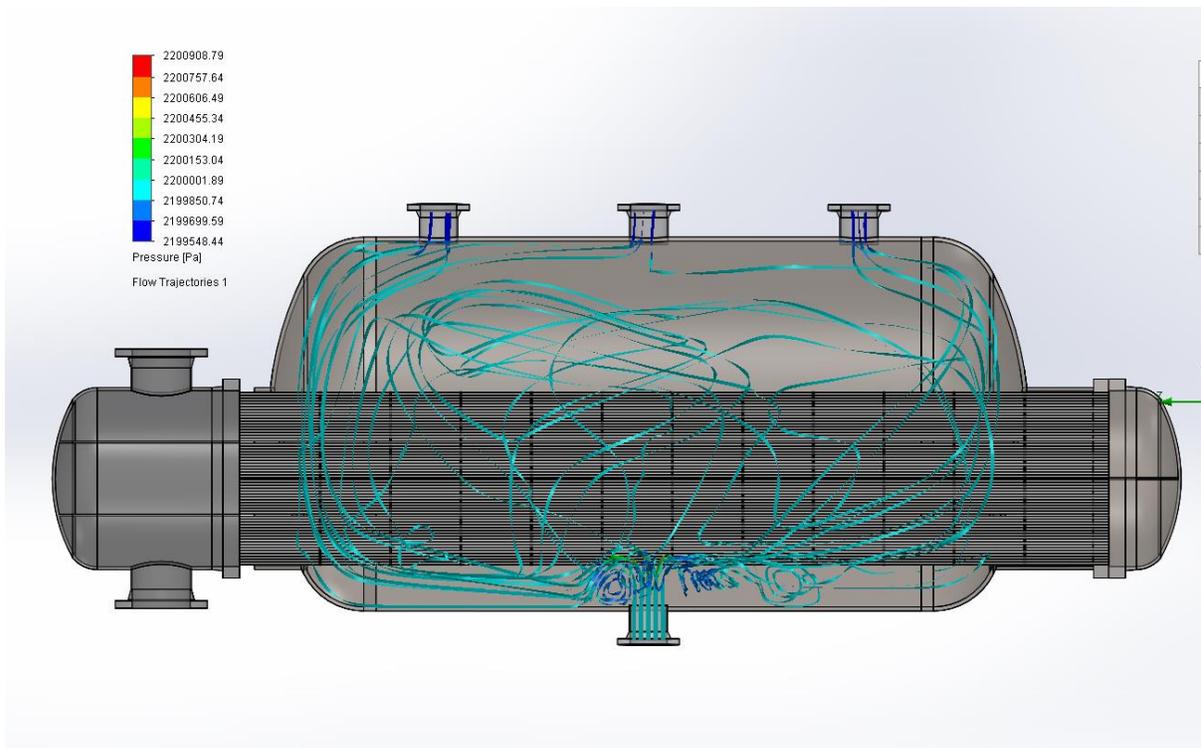


Figura 26. Resultado de simulación de presión en el lado carcasa, vista lateral derecha.

Se considera el intercambiador de calor a presión constante, por lo que se compara la presión de salida obtenida de la simulación con la presión de entrada de diseño, como se observa en las Figuras 25 y 26, la presión de salida tiene un valor de 2199.7 kPa, lo cual indica una variación en la presión, sin embargo, se encuentra en un rango razonable.

Para determinar el porcentaje de error entre la simulación y las condiciones de diseño, se compara el resultado de la velocidad de salida del fluido mediante la siguiente ecuación:

$$\%Error(P_{sal})_{simulación} = \left| \frac{P_{diseño} - P_{simulación}}{P_{diseño}} \right| * 100$$

$$\%Error(P_{sal})_{simulación} = \left| \frac{2267.7 \text{ kPa} - 2199.7 \text{ kPa}}{2267.7 \text{ kPa}} \right| * 100 = 3\%$$

Del resultado anterior se determina un error del 3% en la simulación del modelo, sin embargo, esta variación permite una confiabilidad superior al 90%.

CONCLUSIONES

- Entender la química de incrustaciones de sílice y otros minerales es de suma importancia para la prevención y adecuado sistema de inhibición para reducir el efecto que esto ocasiona sobre el rendimiento del vaporizador.
- El conocimiento de la razón de incrustación de sílice a lo largo del tiempo es de suma importancia para poder pronosticar el estado del vaporizador y poder planificar las limpiezas a tiempo del equipo y de esta manera evitar daños al mismo.
- Los resultados de la caracterización mediante el método de $P\text{-}NTU_t$ utilizando el software de resolución de ecuaciones EES y su comparación con el calor total transferido de diseño presentan una coherencia razonable, con una variación del 0.11% lo cual demuestra la confiabilidad de la caracterización.
- El modelado 3D de la geometría del vaporizador a partir de los datos de construcción proporcionados por el fabricante permiten mediante simulaciones validar las condiciones de diseño y generar un modelo base con el cual se pueden representar configuraciones reales de operación.
- Utilizando el modelo geométrico y estableciendo condiciones de frontera a partir de las de diseño presentadas en la Tabla 5, se realizaron simulaciones para validar el modelo base; en el lado tubo se simularon aspectos como velocidad de salida de flujo, distribución de temperatura y calor total transferido, obteniéndose resultados satisfactorios que demuestran la confiabilidad de la línea base generada; en el lado carcasa se simularon aspectos de velocidad de salida de fluido y presión, obteniéndose de igual manera resultados satisfactorios que demuestran la confiabilidad del modelo.
- Con las simulaciones realizadas en ambos lados del vaporizador se define una confiabilidad en el modelo base de aproximadamente del 90%.

RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación técnica del efecto de la incrustación de sílice en el intercambiador de calor, evaluar el comportamiento del equipo a diferentes espesores de depositación utilizando el valor de conductividad térmica dependiendo de la temperatura de trabajo que se tenga.
- Estudiar técnicas y métodos para inhibir y reducir las incrustaciones ocasionadas por el agua geotérmica en su paso por el intercambiador de calor.
- Realizar simulaciones en el modelo base, utilizando condiciones de operación de plantas reales para determinar factores que permitan mejorar el rendimiento de las unidades.

AGRADECIMIENTOS

La culminación del proyecto expuesto representa el logro de una meta importante en nuestra formación profesional a través de la aplicación de los conocimientos adquiridos en el Diplomado en Geotermia para América Latina Edición 2016, el cual ha sido una oportunidad maravillosa de conocer el papel que cada área aporta al desarrollo de los proyectos geotérmicos que mejoran la calidad de vida de las comunidades y aportan al desarrollo sostenible. Es por ello que en esta oportunidad el equipo del proyecto quiere extender sus agradecimientos a:

Dios Todopoderoso, por permitirnos vivir la experiencia de mejorar personal y profesionalmente, dándonos fortaleza en el momento oportuno y las habilidades necesarias para enfrentar cada reto.

Nuestras familias, por el apoyo incondicional recibido durante el desarrollo del diplomado e inculcarnos el amor por el conocimiento.

Asesores del proyecto: Erick Reyes y Guillermo Martínez, quienes con sus conocimientos y experiencia, se convirtieron en aliados invaluable en la consecución de los objetivos del proyecto.

Oscar Cideos, Baltazar Hernández y Emilio Guerra, por su aporte de conocimientos clave en las etapas de planeación y diseño del proyecto.

Catedráticos, por transmitirnos su valioso conocimiento y experiencias profesionales en cada una de sus áreas de acción, quienes sin duda forjaron una sólida base para el desarrollo de los proyectos finales.

Marilyn Deleón, coordinadora administrativa del diplomado por parte de LaGeo, quien con su carisma y asertividad, fue compañera y orientadora a la vez, procurando el mejor desempeño de los principales involucrados en el éxito del diplomado.

Coordinación académica de la Universidad de El Salvador: Ing. Juan Flores Díaz e Ing. Félix Trujillo, por su labor decidida en velar por la calidad académica de cada módulo del diplomado.

Compañeros nacionales e internacionales, quienes se convirtieron en amigos conforme transcurrió el diplomado, ha sido una experiencia llena de satisfacción compartir con distintas culturas y valorar lo que nos une como países hermanos.

LaGeo/Grupo CEL, UNU/GTP, UES, NDF/ICEIDA, por creer en nuestras habilidades y destrezas, dándonos la oportunidad de conocer el maravilloso mundo de la geotermia y demostrar que el desarrollo de energías limpias representa una apuesta estratégica esencial para los países que pretenden alcanzar un desarrollo sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

1. Carta, José; Calero, Roque; et al (2009), *“Centrales de Energías Renovables”*, Pearson Education S.A., Madrid, ISBN: 978-84-832-2227-0, pp. 728.
2. Cengel, Yunus; Boles, Michael (2012), *“Termodinámica”*, Séptima edición, The McGrawHill Education, México D.F., ISBN: 978-607-15-0743-3, pp. 1041.
3. Krick, Edward (2004), *“Methods Engineering”*, John Wiley & Sons Inc, Nueva York, ISBN: 968-18-0585-2, pp. 39-51.
4. Mueller, A. C. (1973), Heat Exchangers, Sección 18 en Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, Nueva York, pp. 634-793.
5. PMI (2004), *“A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)”*. Sydney, NSW: SAI Global.
6. Shah, R. K. y Mueller, A. C. (1985), “Heat exchanger basic thermal design methods” en Handbook of Heat Transfer Applications, Segunda edición, McGraw-Hill, New York, pp. 41-477.
7. Thulukkanam, Kuppan (2013), *“Heat Exchanger Design Handbook”*, Segunda Edición, CRC Press, Boca Ratón, ISBN: 978-1- 4398-4213-3, pp. 1260.
8. Valdéz Salas B, Schorr Wiener M, Carrillo Beltran M, Zlatev R, Montero Alpirez G, Campbell Ramírez H et al. (2013), *“Corrosión en la Industria geotermoeléctrica”*, En Valdéz Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.), Corrosión y preservación de la infraestructura industrial, Barcelona, España: OmniaScience; 2013, pp. 49-68.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y SITIOS WEB

1. Behn, Arnulfo (s.f.), *“Tratamiento de agua para calderas”*, Santiago, THERMAL engineering LTDA, Consulta: 01/12/2016, Disponible en: <http://es.slideshare.net/miguelangelgranadamejia/tratamiento-agua-calderas-55364684>
2. Campos, Tomás (2016), “Estatus geotérmico mundial y panorama energético”, Diplomado en geotermia para América Latina, Edición 2016, Santa Tecla, El Salvador.
3. CALORCOL (s.f.), *“Silicato de calcio”*, Ficha técnica, Bogotá, Colombia, Consulta: 01/12/2016, Disponible en: http://www.calorcol.com/Portals/0/Contenidos/Documentos/PDF/SILICATO%20DE%20CALCIO_2014.pdf
4. Crabtree, M.; Slinger, D.; et al (1999), *“La lucha contra las incrustaciones, remoción y prevención”*, OilField Magazine, Consulta: 25 de noviembre de 2016, Disponible en: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish99/aut99/p30_49.pdf
5. Contreras, Juan (s.f.), *“Ciclos de Vapor Binarios”*, Consulta: 25 de noviembre de 2016, Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/223301671/Ciclos-de-Vapor-Binarios>

6. Dazne, Adfer (2011), Planta geotérmica en Hawaii, Consulta: 25 de noviembre de 2016, Disponible en: <http://blog.is-arquitectura.es/2011/09/06/descripcion-planta-geotermica-en-hawai/>
7. Olmo, M.; Nave, R. (s.f.). “*Conductividad Térmica*”, HypherPhysics, Consulta: 01/12/2016, Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/thercond.html>
8. Pauer, Ricardo. (1990). “*Lo que ocurre en el interior de la caldera (y en el resto del sistema de vapor)*”. Seminario sobre intercambio iónico, agua y energía, pp. 13.
9. UNAM (s.f.), “*Plantas geotermoeléctricas*”, Consulta: 25 de noviembre de 2016, Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/667/A6.pdf?sequence=6>
10. Tapia S., Ruth (2007), “*Control de incrustación en instalaciones superficiales del campo geotérmico Las Tres Vírgenes*”, Geotermia Vol. 20, No. 1, Comisión Federal de Electricidad. Consulta: 05 de diciembre de 2016, Disponible en: <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2007/vol20/no1/5.pdf>
11. Tecnoce S.L. (2012), “*Achieve optimal heat recovery in a kettle exchanger. Hydrocarbon Processing*”, Consulta: 26 de noviembre de 2016, Disponible en: <http://todoproductividad.blogspot.com/2012/05/recuperacion-de-calor-optima-en-un.html>

APÉNDICES

A. SEGUIMIENTO DEL PROYECTO

A.1. PROGRAMA DE ACTIVIDADES

El programa de actividades describe la duración y fecha de realización de las mismas, además de las actividades precedentes, sin las cuales otra actividad no puede comenzar. Esto permite además analizar la ruta crítica a seguir para formular el proyecto en un tiempo óptimo.

Tabla 6. Programa de actividades.					
ID	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	Revisar propuesta de proyecto	1 día	mar 25/10/16	mar 25/10/16	
2	Definir los alcances del proyecto	1 día	mar 25/10/16	mar 25/10/16	1
3	Establecer objetivos del proyecto	1 día	mar 25/10/16	mar 25/10/16	2
4	Generar un modelo base	5 días	mié 26/10/16	mar 01/11/16	3
5	Validar el modelo base	5 días	jue 03/11/16	mié 09/11/16	4
6	Simular condiciones de diseño	20 días	jue 10/11/16	mié 07/12/16	5
7	Comparar porcentajes de error	3 días	jue 08/12/16	lun 12/12/16	6
8	Elaborar perfil de proyecto	7 días	mar 25/10/16	jue 03/11/16	3
9	Entregar perfil de proyecto	1 día	vie 04/11/16	vie 04/11/16	8
10	Elaborar informe de avance de proyecto	3 días	vie 25/11/16	mar 29/11/16	9
11	Entregar informe de avance de proyecto	1 día	mié 30/11/16	mié 30/11/16	10
12	Elaborar informe final de proyecto	9 días	jue 01/12/16	mar 13/12/16	11
13	Entregar informe final de proyecto	1 día	mié 14/12/16	mié 14/12/16	12
14	Defender proyecto final	1 día	jue 15/12/16	jue 15/12/16	13
DURACIÓN ESTIMADA DEL PROYECTO				37 DÍAS	

A.2. DIAGRAMA DE GANTT

El diagrama de Gantt complementa al programa de actividades expuesto anteriormente, donde se muestra las actividades que fueron c. Ver Figura 27.

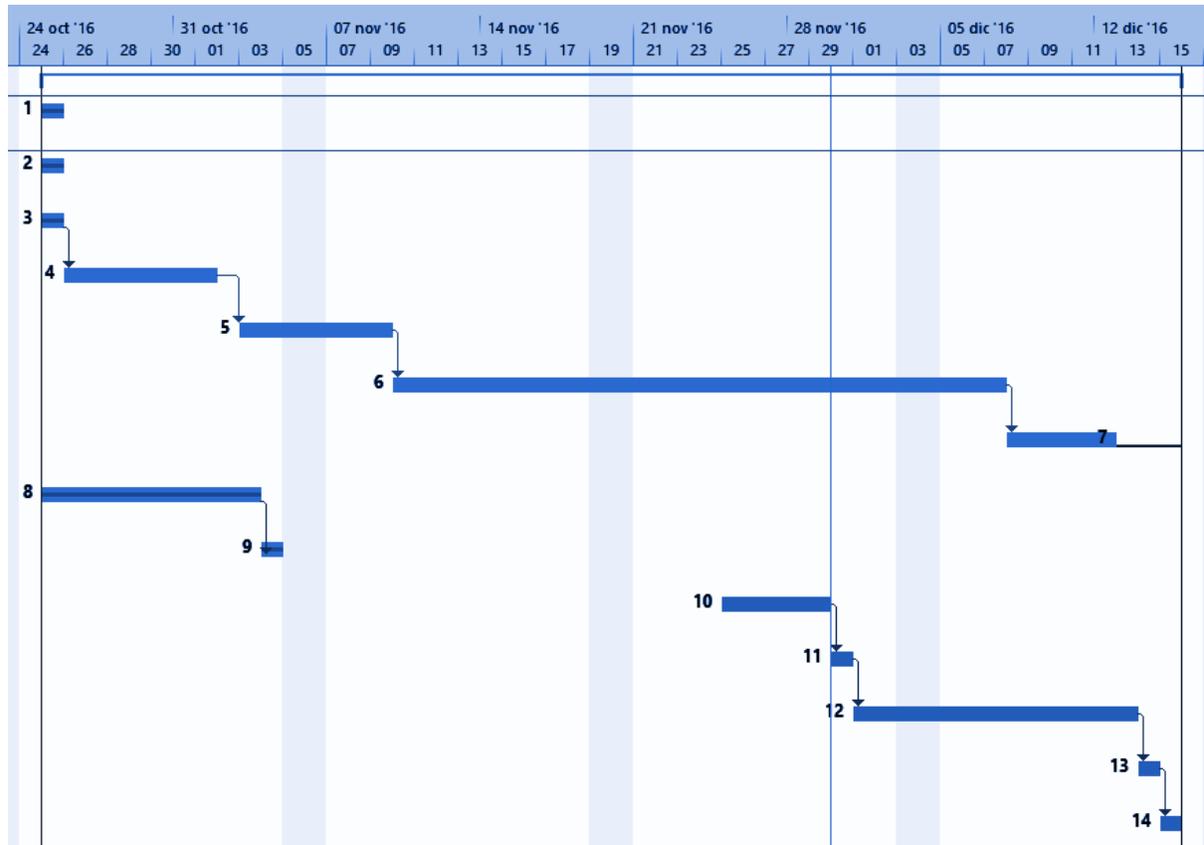


Figura 27. Diagrama de Gantt general.

A.3. ESCALA DE TIEMPO DEL PROYECTO

En la Figura 28 se observa la escala de tiempo para el proyecto y las actividades principales, teniendo como actividad “hito” la fecha de entrega del informe final de proyecto (“HOY” en el diagrama).



Figura 28. Escala de tiempo del proyecto.