



---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS  
ELEMENTOS DEL CICLO CBEI**

(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

Diego García García

Tutor:

M. I. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, México D.F. marzo de 2015





## Contenido

Lista de Figuras .....	V
Lista de tablas.....	VII
Nomenclatura .....	VIII
Simbología .....	VIII
Abreviaturas .....	IX
Símbolos Griegos.....	IX
Objetivo General.....	X
Objetivos Particulares.....	X
Introducción General.....	XI
Capítulo 1 Energía Geotérmica.....	1
1.1 Historia de la geotermia y estructura de la Tierra. ....	2
1.2 Recurso geotérmico y su clasificación.....	4
1.3 Situación mundial de la geotermia.....	10
1.4 La geotermia en México .....	13
1.5 Aplicaciones directas de la Geotermia.....	18
1.6 Generación eléctrica mediante la geotermia.....	19
Capítulo 2 Ciclo CBEI .....	23
2.1 Descripción del CBEI.....	24
2.2 Intercambiador de calor .....	26
2.3 Separador .....	29
2.4 Placa orificio .....	32
Capítulo 3 Ecuaciones fundamentales del flujo en tuberías. ....	36
3.1 Flujo en Tuberías .....	37
3.2 Caída de presión .....	42
3.3 Pérdida de carga .....	43
3.4 Pérdidas mayores (Factor de fricción) .....	43
3.5 Pérdidas menores .....	45
3.6 Potencia necesaria.....	48
Capítulo 4 Caso de estudio.....	49

*ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)*



4.1 Modelado en tercera dimensión de los elementos del CBEI y sus planos .....	50
4.2 Propuesta de ensamble del CBEI.....	56
4.3 Programa para el cálculo de pérdidas .....	57
4.4 Selección de Material .....	60
Capítulo 5 Análisis para dos distintos materiales y resultados .....	65
5.1 Cálculo de pérdidas en cobre .....	66
5.2 Cálculo de pérdidas en acero .....	67
Conclusiones .....	70
Referencias .....	72



## Lista de Figuras

Figura 1 Estructura interna de la tierra (Instituto de Geotermia de Madrid España) .....	2
Figura 2 Primera planta en Larderello (Fanelli, 2004) .....	4
Figura 3 Implicaciones geotérmicas de la tectónica de placas (International Geothermal Association) .....	6
Figura 4 Líneas de actividad geotérmica mundial .....	7
Figura 5 Representación ideal de un yacimiento geotérmico hidrotermal.....	8
Figura 6 Sistema de roca seca (Energías como bienes comunes, 2012) .....	10
Figura 7 Sistema Geotérmico de Tipo Hidrotermal (Mexicana Asociación Geotérmica, 2007) .....	11
Figura 8 Sistema Eléctrico Nacional (Alvarez, 2008) .....	14
Figura 9 Campos Geotérmicos en México (Mexicana, 2007-2014).....	15
Figura 10 Ciclo a Contrapresión (iiDEA, 2013).....	20
Figura 11 Ciclo a Condensación (iiDEA, 2013) .....	21
Figura 12 Ciclo binario (iiDEA, 2013) .....	22
Figura 13 CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea) (iiDEA, 2013) .....	25
Figura 14 Intercambiador de tubo y coraza (Rodríguez) .....	27
Figura 15 Intercambiador de placas planas (Céspedes, 2011) .....	28
Figura 16 Placa orificio, concéntrica, excéntrica y segmentada (Ingeniería) .....	32
Figura 17 Ciclo CBEI (iiDEA, 2013) .....	33
Figura 18 Perfil de Velocidades (Táchira, 2005) .....	40
Figura 19 Diagrama de Moody (Corrales) .....	44
Figura 20 Ensamble del CBEI (iiDEA, 2013).....	56

*ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)*



Figura 21 Gráfica de pérdidas en Watts con tubería de cobre. ....	66
Figura 22 Gráfica de pérdidas en porcentaje con tubería de cobre. ....	67
Figura 23 Gráfica de pérdidas en Watts con tubería de acero. ....	68
Figura 24 Gráfica de pérdidas en porcentaje con tubería de acero. ....	69



## **Lista de tablas**

Tabla 1. Clasificación de los yacimientos según su entalpia (Energías como bienes comunes, 2012) .....	9
Tabla 2. Generación de electricidad a nivel mundial 2007-2009 (Dipippo, 2005) .....	13
Tabla 3. Capacidad instalada y Capacidad operativa (Mexicana, 2007-2014) .....	16
Tabla 4. Producción de plantas geotérmicas en México (Dipippo, 2005) .....	17
Tabla 5. Velocidades de flujo (Arredondo, 2000) .....	41
Tabla 6. Coeficientes de resistencia en accesorios (Leon, 2010).....	47
Tabla 7. Propiedades de los polímeros (Engineering ToolBox, 2014) .....	62
Tabla 8. Tubería tipo M (Engineering ToolBox, 2014).....	62
Tabla 9. Tubería de cobre tipo “L” (Engineering ToolBox, 2014).....	63
Tabla 10. Tubería tipo “K” (Engineering ToolBox, 2014) .....	63
Tabla 11. Tubería de Acero ASTM A-106 grado b (SAC, 2014).....	64



## Nomenclatura

### Simbología

%	Porcentaje	km	Kilómetros
3D	Tercera Dimensión	kWe	Kilo Watts eléctricos
A	Área	K	Coeficiente de resistencia
bar	Unidad de Presión	L	Longitud de Tubería
°C	Grados Centígrados	log	Logaritmo Base 10
cal	Calorías	Lb	Libras
cm	Centímetros	m	Metros
CO <sub>2</sub>	Bióxido de Carbono	MW	Mega Watts
D	Diámetro	M	Flujo Másico
ΔP	Cambio de Presión	No.	Número
ΔP <sub>L</sub>	Caída de Presión	P	Presión
ΔP <sub>total</sub>	Caída de Presión Total	Q	Flujo Volumétrico
E.U.	Estados Unidos	Re	Numero de Reynolds
EP	Energía Potencial	s	Segundos
EC	Energía Cinética	V	Velocidad
EF	Energía de Fuerza	V <sub>prom</sub>	Velocidad Promedio
E	Energía Total	w	Peso
°F	Grados Fahrenheit	W	Watt
g	Gravedad	z	Altura
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfhídrico		
h <sub>L</sub>	Pérdida de Carga Mayor		
h <sub>M</sub>	Pérdida de Carga Menor		





## Abreviaturas

iiDEA	Desalación y Energías Alternas, Instituto de Ingeniería
CBEI	Ciclo Binario de Evaporación Instantánea
CFE	Comisión Federal de Electricidad
B.C.S.	Baja California Sur
B.C.	Baja California
PWG	Pressurized Water Generation
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
ANSI	American National Standards Institute
PVC	Poli cloruro de Vinilo
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
CAD	Computer-aided design
IMPUSLA	Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica

## Símbolos Griegos

$\rho$	Densidad
$\gamma$	Peso específico
$\mu$	Micro
$\nu$	Viscosidad Cinemática
$\varepsilon$	Rugosidad



## **Objetivo General**

Realizar un cálculo de las pérdidas reales en las tuberías de un ciclo binario de evaporación instantánea, con este cálculo se podrán instalar bombas a diversas presiones que contrarresten las caídas de presión a lo largo de las tuberías para obtener una mayor eficiencia en el prototipo del CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea).

## **Objetivos Particulares**

- ❖ Realizar modelado en tercera dimensión de los elementos del CBEI con ayuda del programa Solid Works, de igual forma realizar los planos de dichos elementos.
- ❖ Proponer el ensamble del CBEI, dicha propuesta se modelará en 3D así se podrá obtener dimensiones y longitudes de las tuberías.
- ❖ Analizar las propiedades de operación del CBEI con ayuda de la base de datos REFPROP, asimismo seleccionar los materiales a comparar para las tuberías.
- ❖ Realizar un programa que sea capaz de cuantificar las pérdidas para cada sección de tubería a lo largo del ciclo, esta calculadora proporcionará la potencia necesaria para mitigar las pérdidas resultantes de la transportación del fluido.
- ❖ Mediante el análisis de resultados para dos diversos materiales, se podrá seleccionar el material idóneo para las tuberías del ciclo.



## **Introducción General**

Al día de hoy, mundialmente se vive un problema muy serio respecto a la forma de generación de energía eléctrica, la industria alrededor del mundo utiliza mayormente combustibles fósiles, los cuales son una fuente combustible no renovable y altamente contaminantes para el medio ambiente.

Por otro lado existen fuentes de energía renovables como lo son: la energía solar, la energía eólica y la energía geotérmica. Estas energías además de ser muy amigables con el medio ambiente representan un gran ahorro para la industria en cuanto al gasto de combustibles ya que se trata de combustibles naturales.

La energía geotérmica no es muy conocida si la comparamos con la popularidad de la energía eólica o solar, sin embargo dicha energía cuenta con suficientes recursos para llegar a despuntar como energía alternativa y renovable. México posee gran potencial de energía geotérmica debido a las fallas volcánicas que cruzan el territorio nacional, actualmente México se encuentra dentro de los diez primeros lugares de generación eléctrica por medio de energía geotérmica, sin embargo el potencial que no se ha explotado, es mucho mayor que el actualmente utilizado.

La Universidad Nacional Autónoma de México, en específico el grupo IMPULSA IV, perteneciente al Instituto de Ingeniería, se dio a la tarea de proponer un ciclo de generación eléctrica utilizando energía geotérmica, con la variación de que dicho ciclo pretende utilizar la energía geotérmica de baja entalpia. Alrededor del mundo la mayoría de plantas generadoras de energía por medio de la geotermia utilizan recurso de media y alta entalpia, sin embargo los puntos geográficos donde se puede encontrar este recurso son mucho menores que los recursos de baja entalpia.

Tal es el caso de la república Mexicana donde se pueden encontrar distribuidos por casi todo el país recursos de baja entalpia, es por ello que el proyecto del ahora Grupo iiDEA (Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas) resulta muy atractivo por tener tanto campo y recursos por explotar.

El Grupo iiDEA propone una modificación al conocido ciclo binario, el nuevo ciclo recibe el nombre de CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea), las principales modificaciones respecto al ciclo binario convencional son; el cambio de un intercambiador de tubo y coraza por un intercambiador de placas planas, el cambio de fluido de trabajo,



se reemplaza un fluido orgánico por agua, la implementación de una placa orificio, la cual provoca una evaporación instantánea y por último se agrega un separador de flujos.

A lo largo de la presente tesis se explicará el ciclo y sus modificaciones, la tesis se encuentra dividida de la siguiente manera. En el primer capítulo se dará a conocer la energía geotérmica, conoceremos un poco de su historia, sus clasificaciones, su situación mundial y nacional, sus avances y sus aplicaciones. La geotermia es calor que se encuentra dentro del subsuelo, y dicha energía puede utilizarse para la producción de energía eléctrica entre muchas otras aplicaciones.

Posteriormente se conocerán los diversos ciclos convencionales o más utilizados para la producción de energía eléctrica mediante geotermia. En el segundo capítulo se presenta la propuesta del Grupo iIDEA, el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea, se explica cómo se conforma el ciclo, cuales son los elementos principales y características que distinguen al CBEI de cualquier otro ciclo. El principal objetivo de este proyecto es el aprovechamiento de los recursos de baja entalpia, es importante que se logre aprovechar los recursos del territorio mexicano, ya que cada Watt generado por geotermia representa una ganancia monetaria puesto que la fuente de energía es prácticamente gratuita.

Por otro lado, el objetivo de esta tesis es el acoplamiento del CBEI, principalmente las pérdidas de presión debidas a la fricción en las tuberías. En el tercer capítulo se realizará un repaso de las fórmulas fundamentales involucradas en el flujo en tuberías. Propiedades de los fluidos como lo son la densidad, la masa, el volumen y la viscosidad, son propiedades muy importantes al momento de transportar un fluido, factores como la velocidad del fluido, el área de la tubería y la rugosidad de la misma, son factores que pueden significar ganancias o pérdidas en un arreglo de tuberías.

Una vez que se haya realizado un repaso de los antecedentes adecuados, es procedente pasar a nuestro caso de estudio, en el cuarto capítulo se propondrá un ensamble del CBEI, la propuesta será realizada en modelado asistido por computadora, para ser específicos utilizaremos el programa Solid Works, con la utilización de un diseño en computadora se lograra modificar fácilmente tanto dimensiones como localización de los componentes del ciclo, por otro lado el modelado ahorrará materia prima y recursos, ya que no será necesario maquinar o adquirir los dispositivos hasta realizar diversas experimentaciones teóricas.

En el mismo cuarto capítulo se realizará un programa con el cual se podrá cuantificar las pérdidas en las tuberías ocasionadas por el transporte de los fluidos, ésta

*ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)*



calculadora deberá tener facilidad para adaptarse a cambios en el ciclo, tales como; cambio de material para las tuberías, cambios de longitudes y diámetros de las tuberías, así como cambios en las diferentes propiedades del flujo de trabajo.

Finalmente y una vez teniendo la calculadora de pérdidas se procederá a analizar dos distintos materiales, en el quinto capítulo se mostraran los resultados de los dos distintos análisis, en específico se mostraran graficas de pérdidas y de las potencias requeridas para contrarrestar la perdida ocasionada por el transporte del fluido. Esta tesis contribuirá a una mayor eficiencia en el ciclo, toda vez que las pérdidas son un factor importante al momento de considerar el desempeño del ciclo. Por otro lado se tendrá una idea de las dimensiones que tendrá el modelo físico del CBEI, recordando que una de las prioridades al momento de diseñar el ciclo es que sea de tamaño modular para su fácil transportación.



## **Capítulo 1 Energía Geotérmica**

En este capítulo se conocerá acerca de un tipo de energía renovable la cual ha existido desde la creación del planeta Tierra, de hecho debido al movimiento interno de la Tierra es que se puede obtener dicha energía, la geotermia es calor inmerso en el subsuelo, el cual se puede aprovechar para la obtención de energía eléctrica, sin la necesidad de utilizar combustibles fósiles. Como el fluido geotérmico se extrae a cierta temperatura, ya no es necesario suministrarle calor, lo cual significa que no se desperdiciará combustible para aumentar su temperatura.

Se le denomina energía geotérmica a la energía que se encuentra almacenada en forma de calor por debajo de la tierra. La palabra geotermia tiene origen griego y se deriva de las palabras “geos” que quiere decir tierra y “thermos” que significa calor, el calor de la Tierra. Dicho calor incluye el calor que se encuentra en las rocas, suelos y aguas termales, con cualquiera que sea su temperatura, profundidad o procedencia (Guillermo, Guía de la Energía Geotérmica).

## 1.1 Historia de la geotermia y estructura de la Tierra.

La presencia de manifestaciones térmicas provenientes de la Tierra como lo son: volcanes, aguas termales, entre otros fenómenos, deben haber llevado a los ancestros a suponer que en el interior de la tierra existían algún tipo de calor o energía térmica. Sin embargo fue hasta los siglos XVI y XVII cuando por primera vez se realizaron excavaciones de minas, la profundidad de estas minas era de pocos cientos de metros bajo el nivel del suelo, pero esto fue suficiente para que el hombre dedujera que el incremento de la temperatura era proporcional a la profundidad (International Geothermal Association).

A lo largo de los años y a medida que se estudió el subsuelo, se determinó que la Tierra está constituida básicamente por tres capas concéntricas: el núcleo que se encuentra a mayor profundidad, es la capa que se compone de hierro fundido a una temperatura superior de los 4.000 °C; la siguiente capa es el manto, dicha capa se forma por silicatos de hierro y magnesio, y tiene un espesor de 2.900 km, con una temperatura variante desde los 4.000 °C en su contacto con el núcleo, hasta los 800-1000 °C en su contacto con la corteza, la corteza es la capa más superficial y ésta se encuentra visible por el hombre. La corteza tiene un espesor variable de 5 a 35 km y está formada por silicatos de aluminio y magnesio, variando su temperatura entre los 800-1000 °C del contacto con el manto y los 15-20 °C al contacto con la superficie. Esto se puede ejemplificar de manera más sencilla en la Figura 1.1. El flujo medio de calor registrado en la corteza terrestre es del orden de 1,5 [ $\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{seg}$ ] (Instituto de Geotermia de Madrid España).

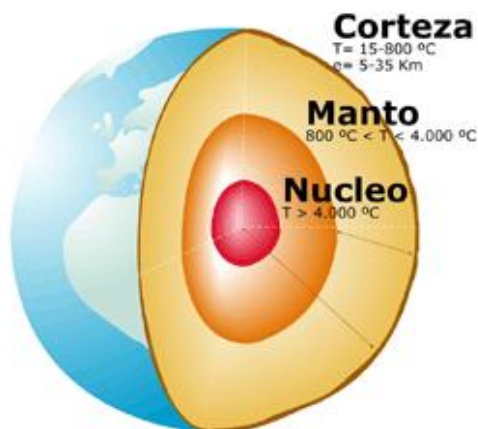


Figura 1 Estructura interna de la tierra (Instituto de Geotermia de Madrid España)



Dicha diferencia de la corteza terrestre en áreas estables con flujo calorífico bajo, y áreas inestables con flujo calorífico muy elevado sirve para marcar los dos grandes tipos de energía geotérmica conocidas: la energía geotérmica de baja temperatura y la energía geotérmica de alta temperatura. Estas dos clasificaciones son muy generales (Instituto de Geotermia de Madrid España).

Las razones por la que se genera el calor interno de la tierra son las siguientes:

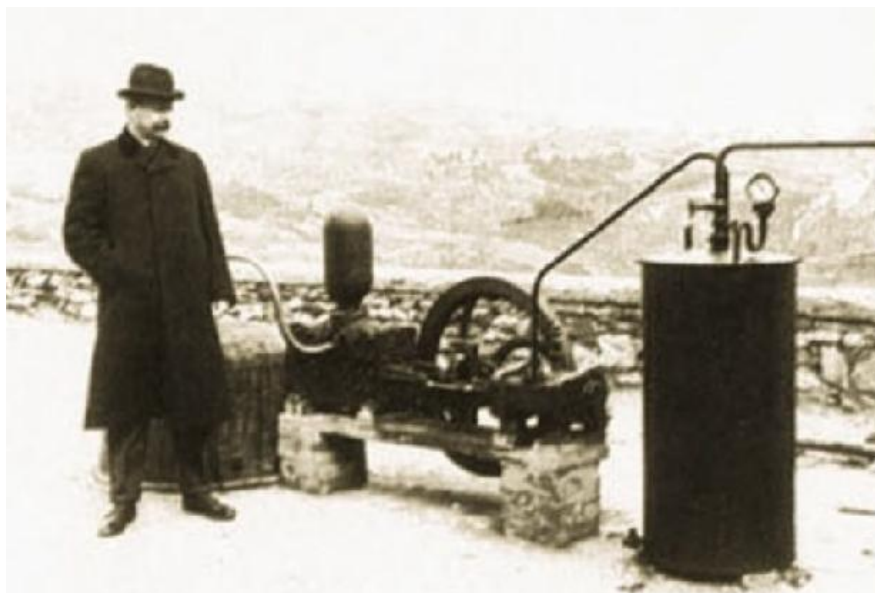
- Desintegración de isótopos radioactivos: se encuentran presente en la corteza y el manto, principalmente se trata de uranio 235, uranio 238 y potasio 40.
- Calor inicial: mismo que se liberó durante la formación del planeta hace 4,500 millones de años y que aún continúa llegando a la superficie.
- Movimientos diferenciales: los que se realizan entre las diversas capas que constituyen la Tierra, principalmente entre el manto y el núcleo.
- Cristalización del núcleo: se presenta ya que el núcleo externo (líquido) se encuentra cristalizando continuamente y en la zona de transición con el núcleo interno (sólido) se libera calor (Guillermo, Guía de la Energía Geotérmica).

En la primera parte del siglo XIX los fluidos geotermales fueron explotados por su contenido energético. Una industria química se estableció en ese periodo en Italia (en la zona ahora conocida como Larderello), para extraer el ácido bórico de las aguas calientes bórico-emergentes de forma natural o de pozos poco profundos, especialmente perforados. El ácido bórico se obtuvo mediante la evaporación de las aguas bóricas en calderas de hierro, usando la madera de los bosques cercanos como combustible. En 1827 Francesco Larderel, fundador de esta industria, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos bóricos en el proceso de evaporación, en lugar de la quema de madera de los bosques, mismos que se agotaban rápidamente (Fanelli, 2004).

Entre 1850 y 1875 la fábrica en Larderello tenía el monopolio en Europa para la producción de ácido bórico. Entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión en esta parte de la Toscana se pone en servicio para calentar los edificios e invernaderos industriales y residenciales. Otros países también comenzaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escala industrial. En 1892 el primer sistema de calefacción distrital inició operaciones en Boise, Idaho (EE.UU.). En 1928, Islandia, otro de los pioneros en la utilización de la energía geotérmica, también comenzó la explotación de sus fluidos geotérmicos principalmente con fines de calefacción doméstica.

En 1904 se realizó el primer experimento para la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico, el mismo tuvo lugar en Larderello, la maquina se puede apreciar en la Figura 2.





*Figura 2 Primera planta en Larderello (Fanelli, 2004)*

El éxito de este experimento fue una clara indicación del valor industrial de la energía geotérmica y marcó el comienzo de una forma de explotación que se ha desarrollado significativamente desde entonces. La generación de electricidad en Larderello fue un éxito comercial, para 1942 la capacidad instalada en industrias geotermoeléctricas había alcanzado los 127.650 kWe. Pronto, varios países comenzaron a seguir el ejemplo de Italia. En 1919 los primeros pozos geotermales de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados en The Geysers, California, E.U. En 1958 una planta de energía geotérmica pequeña comenzó a operar en Nueva Zelanda, en 1959 otra en México, en 1960 en los E.U., seguido de muchos otros países en los próximos años (Fanelli, 2004).

## **1.2 Recurso geotérmico y su clasificación.**

El recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es potencialmente posible. En la corteza se puede apreciar que a medida que se penetra hacia el interior del globo terrestre la temperatura se incrementa gradualmente, dicho incremento de temperatura es lo que generalmente se conoce como gradiente geotérmico (Guillermo, Guía de la Energía Geotérmica).



En la mayor parte del globo terráqueo el gradiente geotérmico registrado es de 2.5-3 °C por cada 100 metros. Dicho incremento se conoce como gradiente geotérmico normal. Por lo tanto el gradiente geotérmico se expresa en °C/km ((IDAE), 2008). Por otro lado, la conductividad térmica es una propiedad característica que depende de cada material, esta propiedad indica su capacidad para conducir el calor y se expresa en las unidades W/m°C.

El gradiente geotérmico es una medida que se utiliza para poder dimensionar las cantidades de flujo de calor que se transmiten de la corteza hacia la atmosfera. Si se realiza el producto de las dos cantidades antes mencionadas, obtenemos el flujo de energía o flujo de calor. Este flujo se expresa en las unidades MW/m<sup>2</sup>, sin embargo no es fácil la medición en campo de dicho flujo, se requiere de sondas térmicas y de sondeos mineros. (Guillermo, Guía de la Energía Geotérmica).

Como es de explorado conocimiento cuando se trata de fenómenos naturales es muy difícil tener condiciones uniformes. El flujo de calor terrestre en los continentes y los océanos es de 65 y 101 MW/m<sup>2</sup>, estas medidas se basan en 24,774 mediciones en 20,201 sitios, los cuales cubren aproximadamente el 62% de la superficie de la Tierra, este estudio se realizó en el año de 1993 y hasta la fecha son los datos más recientes de forma impresa. (Pollack, 1993).

Se denomina litósfera a la capa más externa de la tierra y que se encuentra formada por la corteza y la parte más externa del manto, su espesor puede llegar a variar desde menos de 80km en las zonas oceánicas a más de 200km en las zonas continentales, si se analiza la litósfera, ésta se puede analizar como un cuerpo rígido. Por debajo de la litosfera se encuentra la zona conocida como la astenósfera, la cual tiene de 200-300km de espesor y se puede analizar como un sólido pero con mayor plasticidad. (Guillermo, Guía de la Energía Geotérmica).

Dentro de la misma astenósfera existen movimientos de convección térmica, debidos a la gran diferencia de temperaturas que pueden existir, en su interior también se encuentran volúmenes inmensos de rocas las cuales ascienden y descienden dependiendo de su densidad. Este fenómeno que se sitúa en la astenósfera se puede asimilar a lo que sucede con el agua en una olla hirviendo, el fluido más frío y más denso tiende a hundirse, mientras que el fluido caliente tiende a subir a la superficie, proceso que se repite cíclicamente.

Con el movimiento de materiales internos, se produce la formación de nueva corteza, mejor conocida como dorsales oceánicas, zonas con mínimos valores de espesor cortical. La formación de nueva corteza, dado que hay incremento en la superficie terrestre, produce choques y rozamientos en otras zonas en las que la corteza va desapareciendo, a estas zonas se les denomina zonas de subducción, una parte de la litósfera se pliega y se sumerge bajo otra zona de litósfera. Estas zonas geológicas se dice que están geológicamente activas.

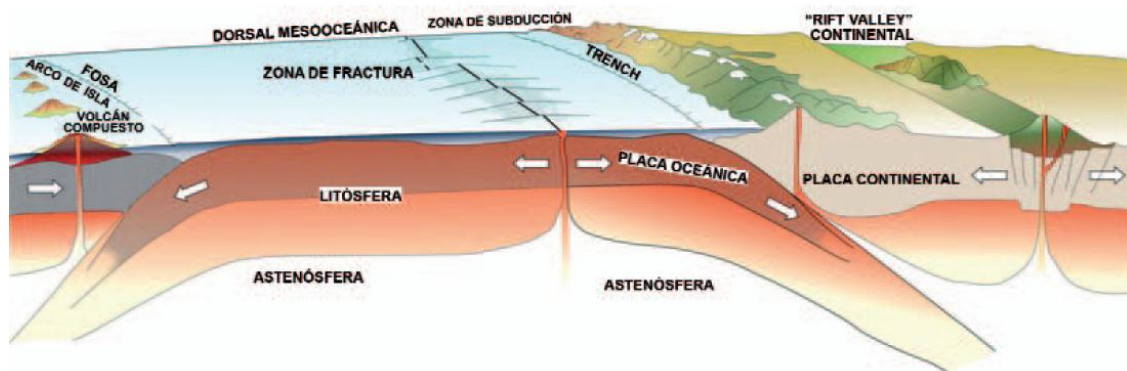


Figura 3 Implicaciones geotérmicas de la tectónica de placas (International Geothermal Association)

En todas las zonas geológicamente activas se pueden producir terremotos, fracturas y erupciones volcánicas, todos estos fenómenos son señales de la actividad tectónica de la Tierra, y son originadas por el calor que fluye desde el interior de la misma. En estas zonas los valores del flujo geotérmico son altos, por lo tanto son de suma importancia para nuestro análisis.

A continuación se muestran las principales líneas de actividad geotérmica alrededor del mundo; fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas indican la dirección en que se mueven las placas hacia las zonas de subducción, el número 1 se refiere a los campos geotérmicos que generan electricidad, el número 2 indica las meso-oceánicas, cordilleras atravesadas por fallas transformantes, el número 3 nos muestra las zonas de subducción, es decir donde la placa de subducción se dobla hacia abajo y se deshace en la astenósfera (Fanelli, 2004).

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

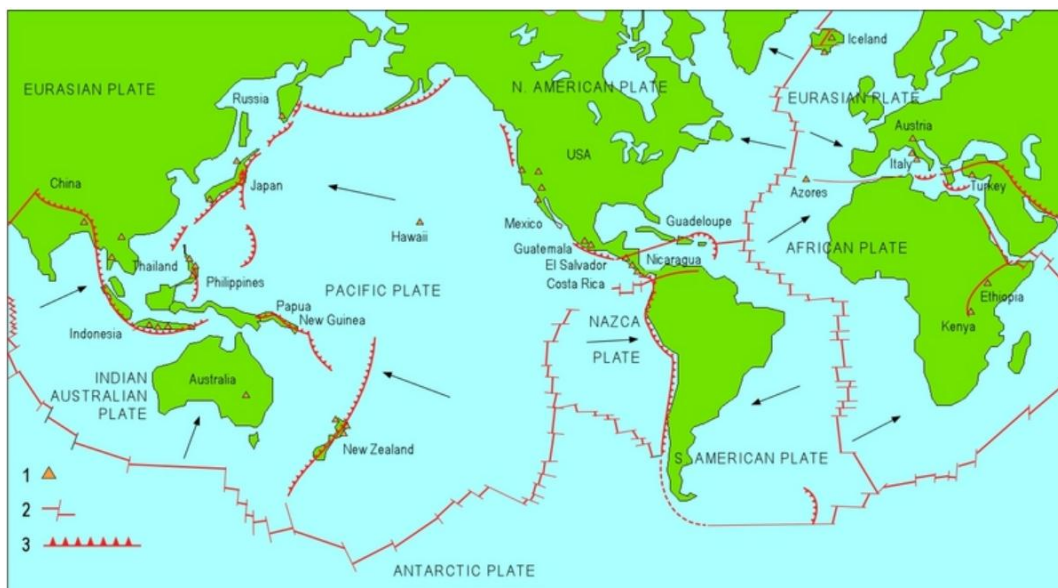


Figura 4 Líneas de actividad geotérmica mundial

Entonces se puede concluir que la generación de actividad o generación de un flujo calorífico, en especial las manifestaciones anómalas se encuentran relacionadas con las placas litosféricas. El concepto de recurso geotérmico es bastante amplio, puede englobar desde el calor encontrado en los horizontes de la superficie terrestre, que puede ser considerado como insignificante, hasta el calor almacenado en rocas que se encuentran en el interior de la Tierra, por lo menos a 10 km de profundidad. En la actualidad se utiliza tecnología de perforación de pozos petroleros para alcanzar mayor profundidad, la perforación más profunda se realizó en la Península de Kola, en Rusia y tuvo 12 km de profundidad.

Un sistema geotérmico es mejor conocido como yacimiento geotérmico, un yacimiento es aquella área geográfica donde se cumplen las condiciones técnicas y geológicas necesarias para poder explotar la energía geotérmica del subsuelo (Celestino, 2009).

Un sistema geotérmico o yacimiento conocido como hidrotermal se compone de tres elementos: 1.- una fuente de calor; la cual puede ser de muy alta temperatura o de baja temperatura, todo dependerá de la profundidad en la que se encuentre dicha fuente, 2.- un depósito o reserva; esto se refiere a un volumen de rocas calientes permeables de las cuales, los fluidos al recorrer su porosidad adquieren o transfieren su calor, esta reserva a su vez se encuentra cubierta de una capa sello, la cual se compone de rocas impermeables las cuales impiden que el calor se propague a la superficie de manera libre 3.- el fluido se refiere a el agua geotérmica en fase líquida o de vapor dependiendo de su temperatura y presión. Generalmente el agua contiene  $CO_2$ ,  $H_2S$ , entre otros elementos,

la figura 1.5 es una representación ideal de un yacimiento ideal. (International Geothermal Association)

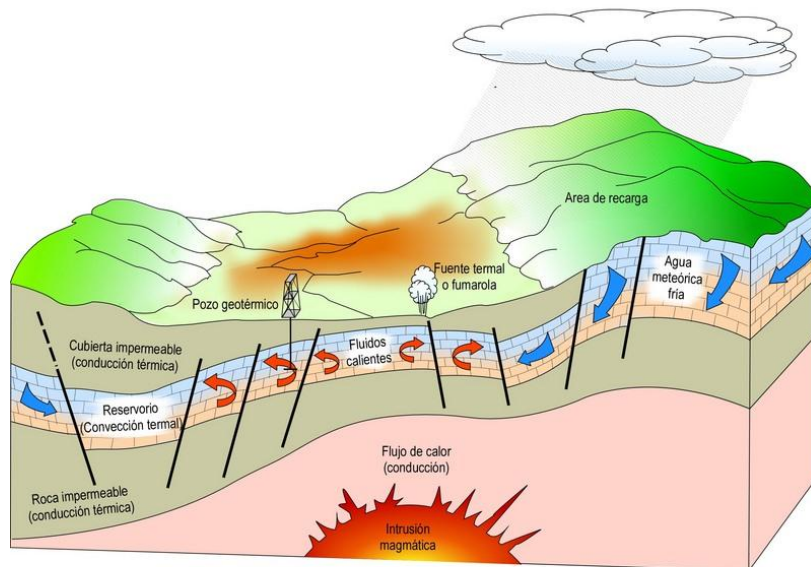


Figura 5 Representación ideal de un yacimiento geotérmico hidrotermal

Los yacimientos geotérmicos convencionales se clasifican de acuerdo con los niveles energéticos que poseen, es decir dependen de la entalpia que maneja el líquido que se encuentra en el interior de dicho yacimiento

- Yacimiento de muy baja entalpia: generalmente se encuentran desde los 250m, por su bajo contenido energético, estos yacimientos son utilizados para la implementación de bombas de calor, estas bombas pueden suministrar calefacción a la urbanidad, es decir pueden enfriar una casa durante el verano o calentar una casa durante el invierno.
- Yacimiento de baja entalpia: son aquellos yacimientos que encuentran a una profundidad menor a los 2.5km, la temperatura que se maneja en estos yacimientos oscila entre los 40-90 °C, son adecuados para la utilización en la agricultura, procesos industriales, piscicultura entre otras.
- Yacimientos de media entalpia: en este tipo de yacimiento el recurso geotérmico se encuentra en temperaturas que oscilan entre los 90-150°C, permitiendo la producción de electricidad mediante fluidos intermedios de bajo punto de ebullición.





- Yacimientos de alta entalpía: son aquellos que cuentan con las mayores profundidades (técnicamente accesibles), la temperatura que manejan estos sistemas se encuentra por arriba de los 150°C esta temperatura es debida a las capas que se encuentran por encima de los fluidos impidiendo el paso del líquido a la superficie. Son excelentes para la producción de electricidad.

Clasificación por Entalpía			
Tipo Yacimiento	Tipo de Terreno	Rango de Temperatura	Uso Principal
Muy Baja Entalpía	Subsuelo con o sin agua	5°C<T<25°C	Climatización
	Aguas Subterráneas	10°C<T<22°C	
Baja Entalpía	Aguas Termales	22°C<T<50°C	Balnearios
	Zonas Volcánicas	T<100°C	Calor de Distrito
	Sedimentos Profundos		
Media Entalpía		100°C<T<150°C	Electricidad, Ciclos Binarios
Alta Entalpía		T>150°C	Electricidad

Tabla 1 Clasificación de los yacimientos según su entalpía (Energías como bienes comunes, 2012)

- Yacimientos de roca caliente: son sistemas que contienen alto potencial térmico pero carecen de fluido de trabajo por lo que se les debe suministrar dicho líquido, se realiza la excavación y se introduce líquido que al entrar en contacto con la roca caliente, eleva su temperatura, para después ser bombeada de regreso a la superficie. Este sistema se implementó por primera vez en Los Álamos, Nuevo México, E.U. en el año 1970. Sin embargo las investigaciones más recientes de dicho proceso se han llevado a cabo en Japón.

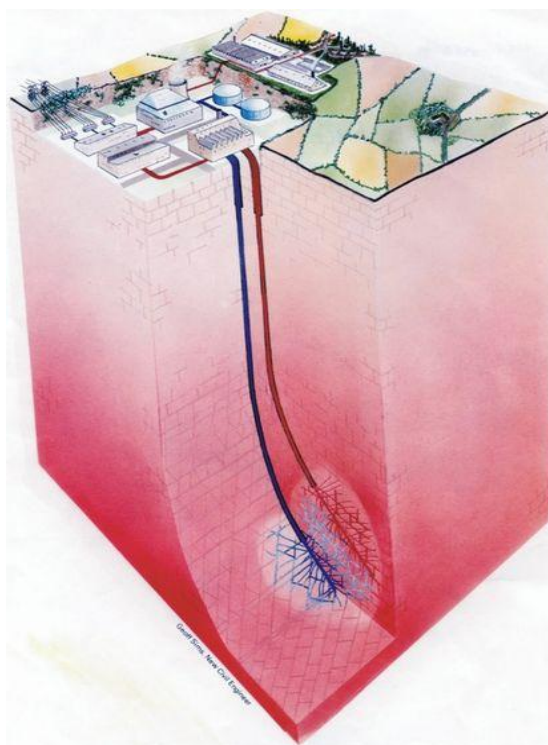


Figura 6 Sistema de roca seca (Energías como bienes comunes, 2012)

- Yacimientos magmáticos: son básicamente los yacimientos formados por la roca fundida en el interior de volcanes activos o en zonas donde se presenta una debilidad en la corteza, su principal virtud son las temperaturas superiores a los 800°C.
- Yacimientos geotérmicos marinos: estos sistemas constan de alta energía térmica, se encuentran en el fondo del mar y sus manifestaciones son descargas hidrotermales y las fumarolas. Por su compleja localización no se han estudiado mucho sin embargo se han llegado a detectar algunos de estos sistemas que cuentan con altos flujos de calor y con temperaturas de hasta 350°C como el localizado en el golfo de California.

### 1.3 Situación mundial de la geotermia

En la actualidad el sistema energético se rige por la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles, tal es el caso del petróleo, el carbón vegetal y mineral y el gas. La situación de este tipo de generación cada vez es más crítica ya que se deben tomar en cuenta todas las repercusiones que esto conlleva, estos recursos se están acabando,

pero la repercusión principal es el impacto que este tipo de combustibles genera al medio ambiente y a la salud de los seres humanos.

Por otro lado la geotermia se genera de una diferencia de temperaturas entre la atmósfera que se encuentra a 15°C y el núcleo de la tierra que se encuentra a aproximadamente 4000°C. El yacimiento que ocupa la presente investigación es el sistema convectivo hidrotermal, para un mejor entendimiento se ilustra en la figura 1.7 ((IDAE), 2008).

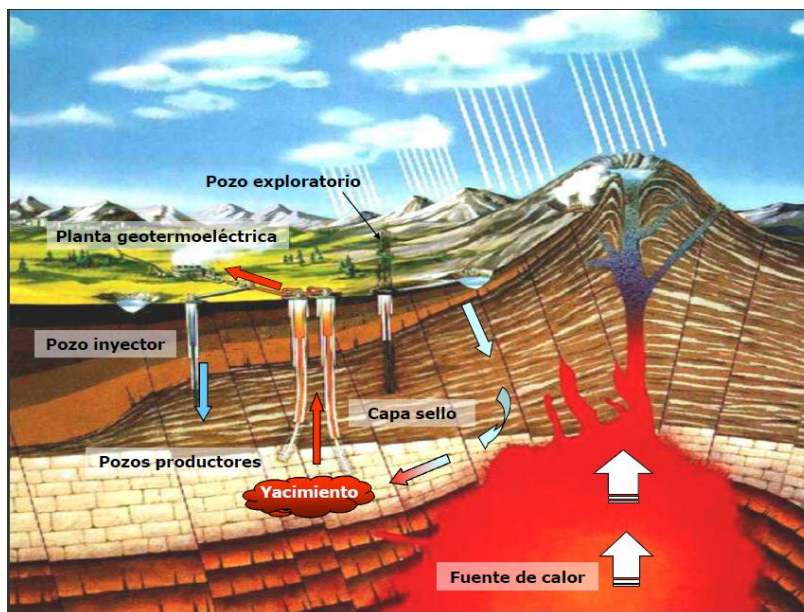


Figura 7 Sistema Geotérmico de Tipo Hidrotermal (Mexicana Asociación Geotérmica, 2007)

Sistema convectivo hidrotermal: se constituye a partir de una fuente de calor y un fluido, la fuente de calor por lo regular es la roca porosa, por otro lado el fluido puede presentarse en fase líquida o gaseosa y regularmente el líquido proviene de aguas meteóricas, es decir agua de lluvia, la cual se filtra al interior de las capas de la tierra llegando hasta la roca caliente donde aumenta su temperatura. Actualmente este tipo de yacimientos son los más utilizados por la geotermia por su explotación comercial.

Como toda nueva tecnología, la geotermia también tiene desventajas:

- Localización puntual: desafortunadamente no todas las regiones cuentan con capacidad de generación geotérmica, sin embargo existen localidades donde no se cuenta con otro tipo de generación eléctrica más que la geotérmica.





- La disponibilidad de maquinaria para su aprovechamiento: por lo mismo que se trata de una tecnología nueva, la infraestructura para aprovecharla no es tan fácil de conseguir, sin embargo con el paso del tiempo y la intrusión de cada vez más países logrará la fácil obtención de dicha maquinaria.
- Alto costo de instalación: debido a su alto grado de investigación previa, este tipo de generación requiere de una inversión inicial grande, sin embargo es muy redituable a corto plazo.
- Emisiones de gases: esta tecnología conlleva la emisión de gases como ácido sulfúrico o sílice, los cuales resultan dañinos para el medio ambiente, sin embargo la emisión de estos gases o el impacto ambiental no se puede comparar con emisiones de combustibles fósiles (Vercelli, 2012).

A pesar de tener diversas “desventajas” las cuales no son significativas si se compara con otros tipos de generación eléctrica, las principales cualidades de la geotermia son;

- La contaminación que produce es casi nula, comparadas con los métodos de generación eléctrica a base de combustibles fósiles.
- El impacto visual y auditivo es muy pequeño.
- La energía geotérmica extraída se traduce en enormes cantidades de energía eléctrica.
- La inversión inicial es prontamente redituable.
- Su factor de planta es de los más efectivos en energías alternativas.
- Prácticamente el combustible que utilizamos es gratis, es por eso que el costo de generación de energía eléctrica es muy bajo.
- En particular México cuenta con grandes reservas de energía geotérmica (Vercelli, 2012).

Actualmente existen ciertos países donde es muy complicada la generación de energía eléctrica por medio de combustibles fósiles y han optado por la generación geotérmica. Estados Unidos se encuentra en primer lugar de generación eléctrica por medio de la geotermia, su planta más grande es llamada “The Geysers”, dicha planta es la más grande a nivel mundial y alcanza una producción constante de 725 MW, suficiente para abastecer a más de 700.000 familias (Vercelli, 2012). A continuación se muestra una tabla que enlista los países con mayor generación eléctrica mediante geotermia.

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)



RANGO	PAÍS	No. DE UNIDADES 2007	GENERACIÓN (MWe) 2007
1	ESTADOS UNIDOS	193	2555.5
2	FILIPINAS	58	1979.9
3	MÉXICO	37	953.3
4	ITALIA	33	811.2
5	INDONESIA	15	807
6	NUEVA ZELANDA	39	572
7	JAPÓN	22	537.7
8	ISLASDIA	24	422.4
9	EL SALVADOR	7	204.3
10	COSTA RICA	6	163
<b>TOTAL</b>		<b>434</b>	<b>9006.4</b>

RANGO	PAÍS	No. DE UNIDADES 2009	GENERACIÓN (MWe) 2007
1	ESTADOS UNIDOS	255	2774.43
2	FILIPINAS	48	1840.9
3	MÉXICO	23	1134
4	ITALIA	39	983.3
5	INDONESIA	35	882
6	NUEVA ZELANDA	43	783.3
7	JAPÓN	31	715.4
8	ISLASDIA	21	535.26
9	EL SALVADOR	8	205
10	COSTA RICA	7	204.3
<b>TOTAL</b>		<b>508</b>	<b>10057.89</b>

Tabla 2.-Generación de electricidad a nivel mundial 2007-2009 (Dipippo, 2005)

En la Tabla 2 se puede observar el desarrollo que se tuvo durante dos años, podemos observar que la mayoría de los países incrementaron su generación, sin embargo Indonesia y Japón fueron los que mayor cambio tuvieron. México, actualmente se encuentra en el cuarto lugar de generación a nivel mundial, muy por debajo de E.U. (Dipippo, 2005)

## 1.4 La geotermia en México

En México se comenzó la producción geotérmica industrial en el año de 1973, en la planta de generación llamada Cerro Prieto. Lo que inicialmente se desarrolló como una fuente alternativa de energía, actualmente sitúa al país dentro en los primeros 10 lugares de producción mediante geotermia a nivel mundial.

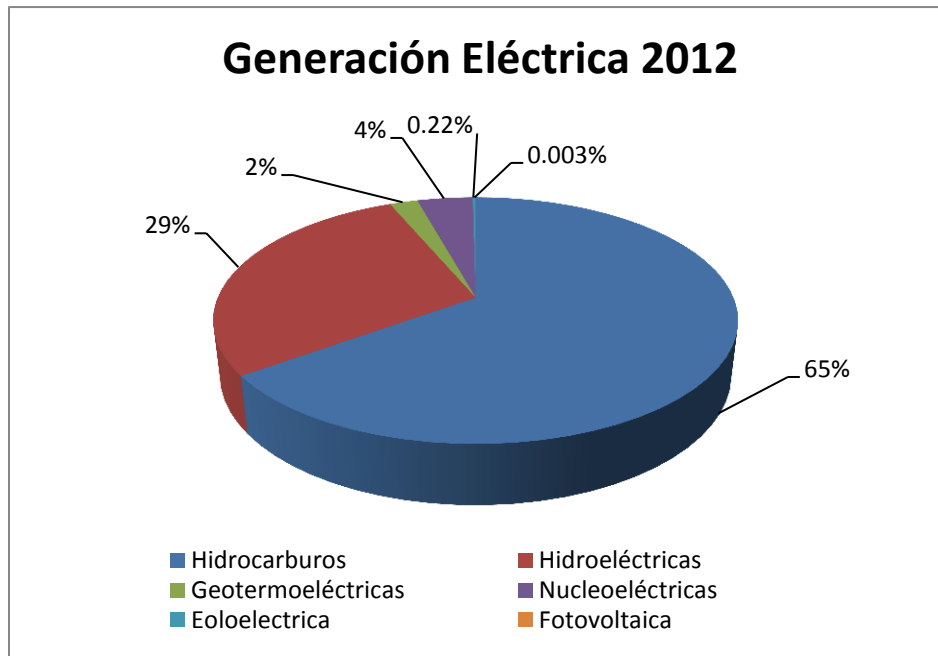


Figura 8 Sistema Eléctrico Nacional (Alvarez, 2008)

Existen varios campos geotérmicos identificados en México, cuatro de ellos se encuentran actualmente bajo explotación, con una capacidad total instalada de 1017.4 MW, lo que representa casi el 2% de la capacidad eléctrica total del país operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el denominado servicio público de energía eléctrica. La CFE tiene identificado un campo más, sin embargo no se han instalado plantas de generación en él, se proyecta que para el 2019 se tenga un campo nuevo en funcionamiento "Cerritos Colorados" aunados a los proyectos geotermoelectricos privados los cuales se espera que empiecen a operar en este año.



Figura 9 Campos Geotérmicos en México (Mexicana, 2007-2014)

Los campos de generación mexicanos son los siguientes (Mexicana Asociación Geotérmica, 2007):

- Las tres vírgenes (B.C.S.)- esta planta cuenta con 10 MW de capacidad construida y distribuida en dos unidades a condensación. Ésta es la planta más pequeña en México.
- Los Humeros (Puebla).- cuenta con una capacidad instalada de 93.4 MW, integrada por ocho unidades a contrapresión de 5 MW, también cuenta con dos unidades a condensación de 26.7 MW cada una. Sin embargo de las unidades a contrapresión, 5 de estas se encuentra fuera de servicio, solo se utilizan como respaldo, en caso de que alguna otra deba salir a mantenimiento, dejándonos una capacidad operativa efectiva de 68.4 MW. Se encuentra en construcción una unidad adicional de 26.7 MW, la cual tiene programada su entrada en operación para el año 2016.
- Los Azufres (Michoacán).- esta planta cuenta con 194 MW de capacidad total, constituida por cinco unidades a condensación de flasheo sencillo (una de 50 MW y las otras cuatro de 26.5 MW cada una), siete unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW cada una. A la fecha estas dos unidades de ciclo binario se encuentran fuera de servicio, por lo tanto la capacidad operativa es de 191 MW. Adicionalmente, desde enero de 2013 se encuentra otra unidad de 50 MW, en lo que se conoce como el proyecto Los Azufres III, dicha unidad está programada para entrar en operación en enero del 2015.

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)



- Cerro Prieto (B.C.)- cuenta con una capacidad neta de 720 MW, integrada por cuatro unidades de 110 MW cada una, cuatro unidades de 37.5 MW cada una, una unidad de baja presión de 30 MW y cuatro unidades de más de 25 MW cada una. Todas las unidades son a condensación de un solo flasheo, excepto las de 37.5 MW que son de doble flasheo. Las cuatro unidades más antiguas de 37.5 MW actualmente se encuentran fuera de operación, por tanto se tiene una capacidad operativa de 570 MW.
- Cerritos colorados (Jalisco).- en este lugar no se cuenta con plantas en operación, sin embargo ya se cuenta con pozos perforados y con un potencial evaluado referido por la CFE de 75 MW.

En la siguiente tabla 3, se muestran las capacidades netas y las capacidades efectivas de cada planta:

CAMPO	CAPACIDAD INSTALADA (MW)	CAPACIDAD DE OPERACIÓN (MW)
Cerro Prieto, BC	720	570
Los Azufres, Mich.	194	191
Los Humeros, Pue.	93.4	68.4
Las Tres Vírgenes, BCS.	10	10
<b>Totales</b>	<b>1,017.40</b>	<b>839.4</b>

*Tabla 3 Capacidad instalada y Capacidad operativa (Mexicana, 2007-2014)*

Asimismo en la tabla 4, se observan las diversas plantas de México y a su vez podemos analizar con qué tipos de unidades cuenta cada planta. A pesar de que la geotermia genera poco menos del 3% de electricidad en nuestro país, Cerro Prieto con sus 720 MWe abastece el 75% de las necesidades eléctricas en el noreste del país, en la frontera con california (Gonzalez).

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)



<u>Planta</u>	<u>Año</u>	<u>Tipo</u>	<u>MW- generados</u>	<u>No. Unidades</u>	<u>MW-total</u>
Pathe	1959	1-flash	3.5	1	3.5
<u>Cerro Prieto I</u>					
Unidad 1&2	1973	1-flash	37.5	2	75
Unidad 3&4	1979	1-flash	37.5	2	75
Unidad 5	1981	1-flash	30	1	30
<u>Cerro Prieto II</u>	1984	2-flash	110	2	220
<u>Cerro Prieto III</u>	1985	2-flash	110	2	220
<u>Cerro Prieto IV</u>	2000	1-flash	25	4	100
<u>Los azufres</u>					
Unidad 1	1982	1-flash	5	1	5
Unidad 2-5	1982	1-flash	5	4	20
Unidad 6	1986	1-flash	5	1	5
Unidad 7	1988	1-flash	50	1	50
Unidad 9-10	1990-92	1-flash	5	2	10
Unidad 11-12	1993	Binario	1.5	2	3
Unidad 13-16	2003	1-flash	25	4	100
<u>Los humeros</u>					
Unidades 1-2	1990	1-flash	5	2	10
Unidades 3-5	1991	1-flash	5	2	10
Unidad 6	1992	1-flash	5	1	5
Unidad 7	1994	1-flash	5	1	5
Unidad 4	2004	1-flash	5	1	5
Unidad 8	2008	1-flash	5	1	5
<u>Los humeros II</u>	2011	1-flash	25	1	25
<u>Tres vírgenes</u>	2002	1-flash	5	2	10
<u>Maguarichic (Piedras de lumbre)</u>	2001	Binario	0.3	1	0.3
<u>Total</u>				<b><u>41</u></b>	<b><u>983.3</u></b>

Tabla 4 Producción de plantas geotérmicas en México (Dipippo, 2005)



## 1.5 Aplicaciones directas de la Geotermia

Como ya se ha mencionado el uso del calor interno de la Tierra es muy antiguo. La energía geotérmica actualmente tiene diversos usos, dependiendo de la localización geográfica, los tipos de yacimientos existentes e incluso de la forma de vida de los habitantes de las regiones.

### Balneología

Es el uso más antiguo de la geotermia, comunidades antiguas como romanos y aztecas, entre otras culturas la utilizaban para tomar baños y lo utilizaban como método de relajación. El auge de la balneología es debido a que no se necesita un alto rango de temperaturas para su utilización con este propósito.

En México la aplicación más popular para la energía geotérmica es la balneología. Debido a que en el centro del país se encuentra la llamada faja volcánica transmexicana la cual alberga actividad volcánica y propicia que exista recurso geotérmico a lo largo del país. Sin embargo debido a la sobreexplotación de los recursos, algunos yacimientos han tenido un descenso considerable en sus niveles de agua.

### Agricultura

También se puede emplear la geotermia para la agricultura, básicamente se utiliza la geotermia en los invernaderos, para mantener la temperatura adecuada para ciertas cosechas. Si se logra controlar la temperatura en un invernadero, se puede evitar un cambio brusco de temperatura, estos cambios afectan el cultivo.

Por otro lado si se ocupa la geotermia para calentar el suelo se puede acelerar el crecimiento de las plantas y se aumenta la producción, a este proceso se le conoce como calefacción de suelo. Otro uso de la geotermia sería el riego de las plantas sin embargo no es muy común la utilización ya que el fluido geotérmico llega a contener toxinas que pueden perjudicar las plantas (Fanelli, 2004).



### Calefacción

Se emplea en los países donde el clima es frío la mayoría del año, por ejemplo en Islandia quien es el principal consumidor de energía geotérmica para calefacción. Se extrae el calor del subsuelo y se utiliza para ambientar los hogares. A pesar de que la inversión inicial es muy considerable, el ahorro a largo plazo es muy redituable ya que la energía utilizada solo es para bombear el fluido geotérmico a la atmósfera.

### Refrigeración

Cuando se habla de refrigeración, es referido a un sistema en el que se puede manejar el calor en 2 vías, tanto de frío a caliente, como de caliente a frío, esto permite por medio de un segundo fluido que en este caso sería un refrigerante, poder realizar un intercambio de energía ya sea para calentar o enfriar cualquier tipo de estancia dependiendo cual se ala necesidad (Fanelli, 2004).

## **1.6 Generación eléctrica mediante la geotermia**

Los yacimientos pueden ser explotados para la generación de energía eléctrica en función de la temperatura del fluido geotermal. Dependiendo de las características del recurso geotérmico, la generación de electricidad se realiza mediante turbinas de vapor convencionales y plantas de ciclo binario (International Geothermal Association).

Las plantas de generación eléctrica con recurso geotérmico son conocidas como plantas geotermoeléctricas y se clasifican por el tipo de ciclo que utilizan:

### Ciclo a contrapresión:

Este tipo de ciclo es el más barato en cuanto a inversión y el más simple en cuanto a operación. En el ciclo a contrapresión el fluido geotérmico se extrae del subsuelo, y se lleva a un separador, el cual, como su nombre lo dice, separa el vapor del líquido del fluido geotérmico. El vapor obtenido del separador es llevado hacia una turbina que se encuentra conectada a un generador, es ahí de donde se obtiene la generación de energía eléctrica.



Una vez que el vapor recorre la turbina es expulsado a la atmosfera. Este tipo de plantas son utilizadas como plantas piloto, las cuales sirven para determinar la factibilidad de los pozos geotérmicos. También son utilizadas cuando el fluido geotérmico tiene un alto contenido de gases no condensables (Fanelli, 2004).

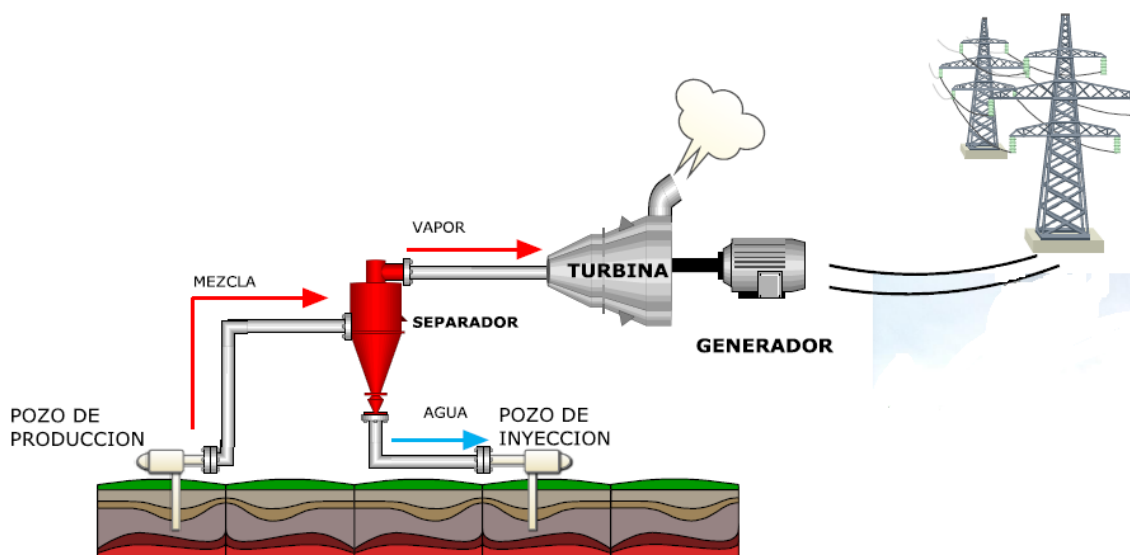


Figura 10 Ciclo a Contrapresión (iiDEA, 2013)

### Ciclo a condensación:

Las plantas de ciclo a condensación son más sofisticadas ya que utilizan mayor número de equipos auxiliares. El fluido geotérmico es extraído del pozo, es llevado a un separador y el vapor resultante es llevado a la turbina, que a su vez está conectada al generador eléctrico.

A diferencia del ciclo a contrapresión, una vez que el vapor recorre la turbina, es llevado a un condensador donde entrega el poder calorífico que aún conserva y es reinyectado al subsuelo. El condensador a su vez está conectado a una torre de enfriamiento la cual sirve para enfriar el líquido que adquirió temperatura del fluido geotérmico, debido a que este ciclo contempla un condensador y una torre de enfriamiento el espacio necesario para montar dicho ciclo es casi el doble que el espacio utilizado en el ciclo a contrapresión (Fanelli, 2004).

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

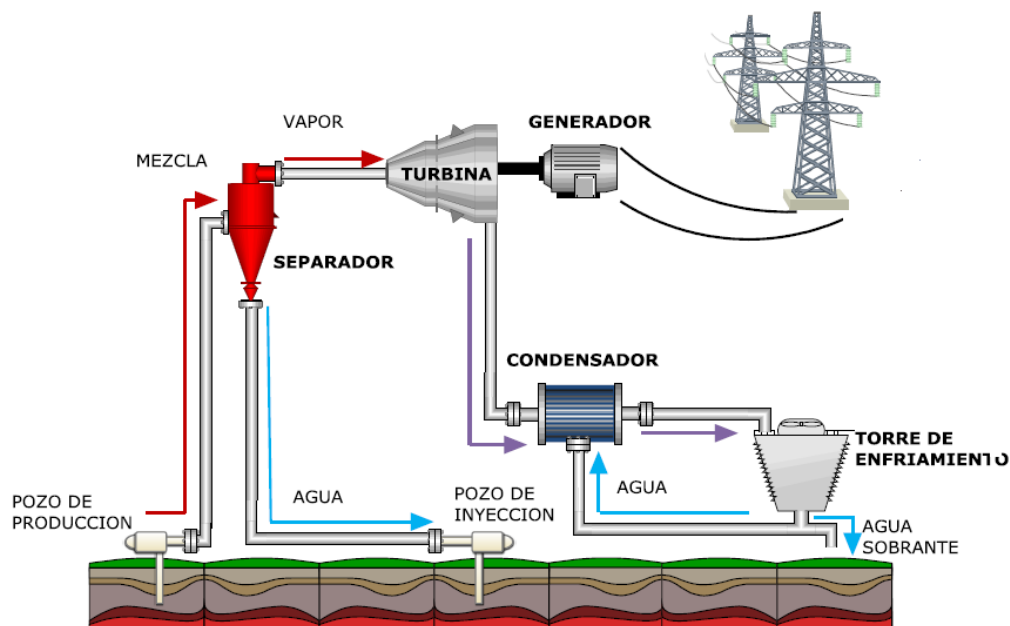


Figura 11 Ciclo a Condensación (iiDEA, 2013)

Ciclo binario:

El ciclo binario utiliza un fluido secundario aparte del fluido geotérmico, usualmente el líquido secundario es de carácter orgánico, se utilizan fluidos que tienen bajo punto de ebullición y una alta presión de vapor a bajas temperaturas, en comparación con el agua. El fluido secundario se maneja básicamente dentro de un ciclo Rankine ((IDAE), 2008).

El fluido geotérmico es extraído del subsuelo y es llevado a un intercambiador de calor, en el intercambiador de calor el fluido geotérmico entrega su calor a nuestro fluido secundario, logrando que el fluido secundario se evapore. Una vez evaporado el fluido es llevado directamente a la turbina, una vez que recorre la turbina, el fluido secundario pasa por un condensador en donde regresa a su fase líquida, ya que tenemos el fluido secundario en fase líquida se repite el ciclo.

En el condensador se utiliza un tercer fluido que proviene de una torre de enfriamiento igual que en el ciclo a condensación. Este tipo de plantas está enfocado para yacimientos que contienen fluidos que oscilan entre temperaturas de 85 a 170°C. Si la temperatura fuera más baja se necesitaría un intercambiador de calor mucho más grande y esto haría que nuestro proyecto no fuera rentable debido a sus dimensiones.

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

El ciclo binario es muy práctico para el aprovechamiento de los yacimientos de media entalpia, sin embargo cuenta con algunos inconvenientes. Los líquidos utilizados como fluidos secundarios son tóxicos y poco amigables con el medio ambiente aparte de sus altos costos, por otro lado los intercambiadores y los condensadores también representan un gran gasto (International Geothermal Association).

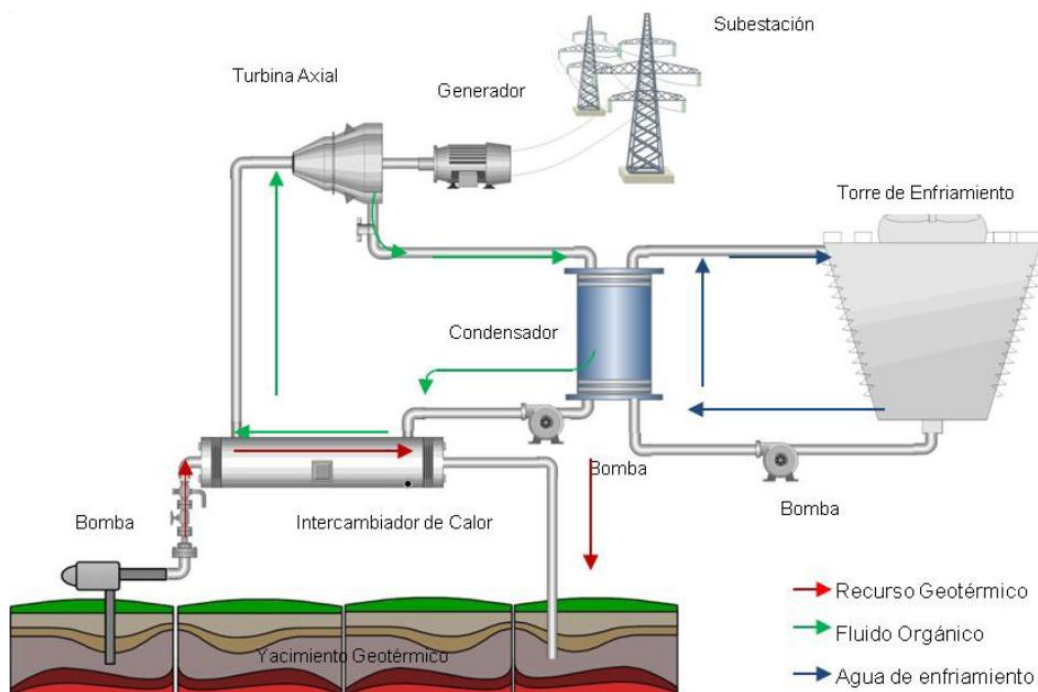


Figura 12 Ciclo binario (iiDEA, 2013)



## **Capítulo 2 Ciclo CBEI**

Como se comentó en el primer capítulo, para ésta tesis se utilizara la geotermia para la producción de energía eléctrica. En éste capítulo se analizará un ciclo diferente a los anteriormente mencionados, dicho ciclo es una modificación del ciclo binario convencional añadiendo elementos de un ciclo flash geotérmico.

El ciclo denominado CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea) presenta algunos cambios respecto al ciclo binario común, los principales cambios son los siguientes; se cambia el fluido de trabajo que originalmente era un fluido orgánico por agua desmineralizada, se utiliza un intercambiador de calor de placas planas, comúnmente se usa un intercambiador de tubo y coraza, sin embargo el intercambiador de placas puede recibir un mejor mantenimiento y en un tiempo más corto, por otro lado se encuentra la placa orificio la cual realiza una evaporación flash, la evaporación flash es el principal motivo de que se puedan utilizar recursos geotérmicos de baja entalpia en el CBEI, finalmente se encuentra un separador de flujo, que como su nombre lo indica, ayudará a la obtención de vapor.



## 2.1 Descripción del CBEI

En el año 2008, por medio del grupo IMPULSA 4 perteneciente al Instituto de Ingeniería de la UNAM, se propuso un ciclo que fue llamado PWG cuyo siglas significa “Pressurized Water Generation”, posteriormente se le dio el nombre de CBEI, actualmente el grupo iiDEA trabaja en la realización de un prototipo piloto dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Uno de los objetivos de esta tesis se basa en el cálculo de las caídas de presión, pérdidas de carga y las longitudes de las tuberías que conformaran dicho ciclo, sin embargo para ello es necesario conocer los elementos que componen el CBEI y su funcionamiento.

A continuación se realiza una breve descripción del ciclo binario de evaporación instantánea. Dicho ciclo consta de tres diversos fluidos; el fluido geotérmico, el fluido de trabajo y el fluido de enfriamiento, posteriormente se ilustrará el ciclo para una mayor comprensión.

El ciclo comienza con la extracción del fluido geotérmico del pozo por medio de una bomba, el fluido geotérmico es llevado hacia un intercambiador donde cede su calor al fluido de trabajo, una vez cedido el calor, el recurso geotérmico es reinyectado al yacimiento geotérmico.

Continuando con el ciclo; una vez que el fluido de trabajo ha recibido calor del fluido geotérmico y ha aumentado su temperatura es llevado hacia una placa orificio, la placa orificio no es más que una válvula con la que podemos realizar una evaporación flash, es decir que el líquido saturado que viaja por la tubería sufre un cambio súbito de presión y una parte de él se convierte en vapor, la otra parte continúa como líquido.

Toda vez que se ha realizado la evaporación flash, el flujo bifásico es llevado a un separador de flujo donde se logra dividir el vapor del líquido, el vapor que es dividido es dirigido hacia una turbina de altas revoluciones, el vapor entra a los alabes de la turbina haciéndolos girar, dichos alabes están conectados a un rotor que a su vez se conecta con un generador de electricidad, obteniendo así energía eléctrica.

Posteriormente a que el vapor se ha expandido y perdió presión es llevado hacia un condensador donde se logrará regresar a la fase líquida, cuando se cuenta con el líquido a la salida del condensador, el fluido pasa por una bomba y se dirige hacia un colector o mezclador donde ya espera el líquido que fue dividido en el separador. En mezclador se

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

juntan los líquidos para después ser transportados por medio de una bomba hacia el intercambiador y volver a repetir el ciclo.

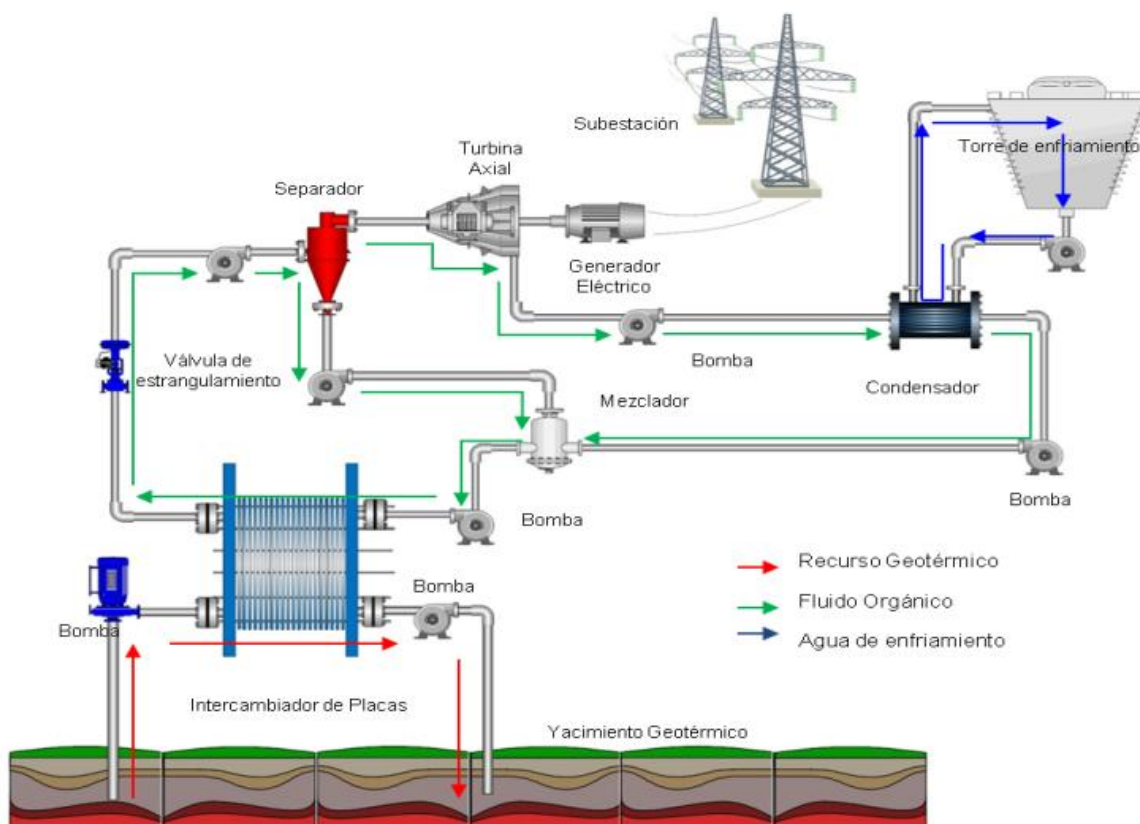


Figura 13 CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea) (iiDEA, 2013)

Un ciclo binario convencional presenta varias deficiencias y esos son básicamente los problemas que se busca mitigar con las modificaciones realizadas al CBEI, a continuación se describen:

- Uso de un fluido orgánico; el manejo es complicado y se requiere de personal especializado para su manejo, y si se llegara a tener una fuga, esta resultaría muy costosa.
- Uso de un evaporador y un calentador: estos dispositivos sufren de corrosión e incrustación, igualmente deben tener un constante mantenimiento, sin olvidar las bajas eficiencias. Se sustituyen por un intercambiador que será el único en contacto con el fluido geotérmico, presentará corrosión pero es más fácil su mantenimiento y el acercamiento es mayor, aparte de tener menores dimensiones.



- La turbina: Si se utiliza una turbina de altas revoluciones, no se requiere de tanta presión para su operación, por otro lado el separador de flujos se estima que tenga una eficiencia de más del 90%, lo cual resulta muy benéfico a los alabes de dicha turbina.

## 2.2 Intercambiador de calor

Debido a que se trata de un ciclo térmico, existen diversos procesos del ciclo donde se realizan transferencias de calor, la transferencia más importante se realiza cuando el fluido geotérmico cede energía calorífica al fluido de trabajo, para poder realizar este proceso se utiliza un elemento llamado intercambiador de calor. Los intercambiadores de calor como su nombre lo dice, se encargan básicamente de transferir el calor de un punto a otro de manera específica y en una determinada dirección para diversas aplicaciones, a continuación se explica su principio de funcionamiento.

Inicialmente los intercambiadores se pueden clasificar por su tipo de flujo:

- flujo paralelo
- flujo cruzado
- contraflujo

Se debe entender que el principio de funcionamiento es mediante un gradiente de temperatura entre los fluidos de trabajo, también se debe tomar en cuenta la ley cero de la termodinámica, que nos explica que el calor solo se transfiere en una dirección, del fluido con mayor temperatura al fluido de menor temperatura. En un intercambiador la transferencia de energía se utilizan los tres diferentes mecanismos; conducción, convección y radiación.

### Tipos de intercambiadores:

Se pueden encontrar intercambiadores de calor en una inimaginable variedad de formas, sin embargo todas se rigen de manera general por dos diferentes formas de fabricación; tubulares y de placas planas (también conocidos como de plato). Dichas formas de clasificar tienen sus ventajas o desventajas dependiendo de la aplicación a la que esté enfocado el intercambiador.

### Tubo y coraza

Dicho intercambiador consiste en un conjunto de tubos que se encuentran dentro de un condensador llamado carcaza, al flujo del fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente como flujo interno, mientras que el fluido que corre dentro del contenedor se le conoce como flujo externo. Los tubos internos se sujetan a una placa para poder proporcionar un sello adecuado. Existen sistemas en donde la diferencia de presiones es muy alta, en este tipo de casos el fluido con mayor presión circula como fluido interno mientras que el de menor presión se convierte en fluido externo.

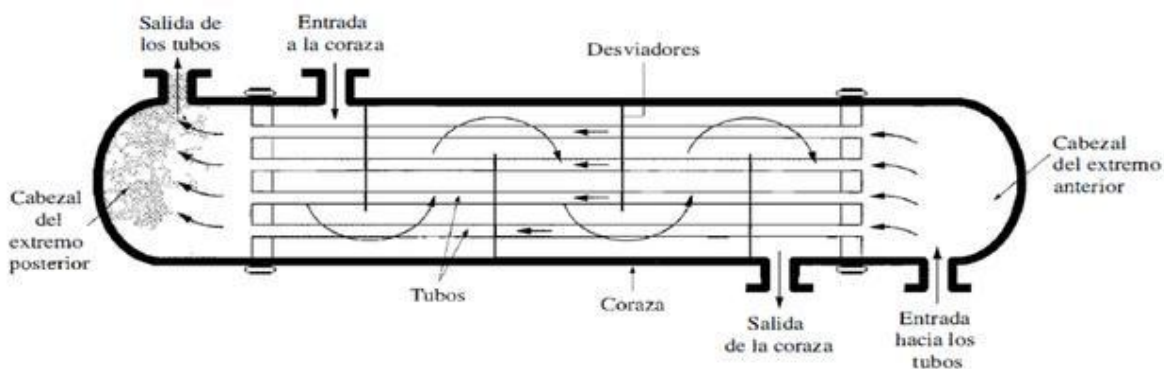


Figura 14 Intercambiador de tubo y coraza (Rodríguez)

El costo de los materiales es importante, es por ello que los fluidos con mayor presión se hacen circular internamente ya que los tubos del intercambiador se pueden fabricar para soportar presiones más altas a un menor costo.

### Placas planas (plato)

El intercambiador de placas planas consiste en una serie de láminas delgadas las cuales separan dos líquidos que se encuentran a diferente temperatura, los líquidos fluyen alternados y separados por las placas, el flujo se realiza en direcciones contrarias, con esto logramos una mayor eficiencia en la transferencia de calor.

Sin embargo estos dispositivos en sus diversas presentaciones se encuentran limitados, esto debido al material de fabricación y tipos de sellos, las limitaciones son la presión y la temperatura. Para el presente análisis, el tipo de intercambiadores utilizado soporta una



presión de 35 [bar] y una temperatura de 200-500°C, estas limitaciones se encuentran dentro de los parámetros de operación del CBEI (Zarate).

Una vez que se conocen las limitaciones, las cuales no representan impedimento para el CBEI, se deben conocer las principales ventajas de este tipo de intercambiadores:

- Tamaño: a pesar de tener una gran cantidad de superficie de transferencia en cada placa, el espacio requerido para el conjunto total es muy compacto.
- Cero mezcla de fluidos: debido a los sellos independientes con los que cuenta cada placa se evita la mezcla de los fluidos de trabajo. Sin embargo estos sellos son la principal limitante del intercambiador, debido a la temperatura que soportan dichos empaques.
- Aumento de placas: es posible ampliar el número de placas para el futuro incremento de del rendimiento térmico, asimismo se renueva la efectividad al sustituir placas viejas por nuevas.
- Mantenimiento: gracias al mecanismo de aumento o disminución de placas, esta pueden se extraídas para su mantenimiento sin necesidad de desconectar por completo el intercambiador, esto aumento el factor de operación de dicho elemento. Esto se reflejó en un bajo costo de mantenimiento.

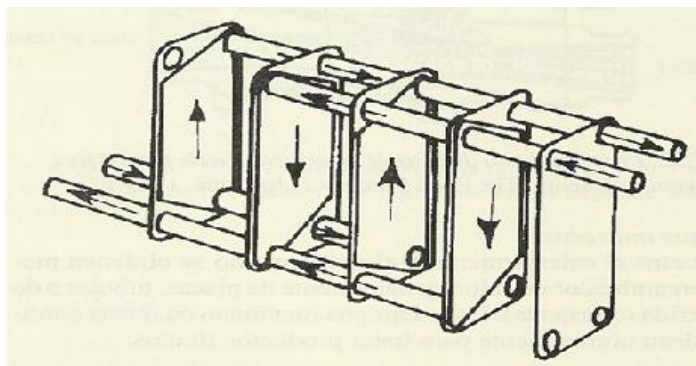


Figura 15 Intercambiador de placas planas (Céspedes, 2011)

#### Clasificación de intercambiadores según su forma de operación

- Flujo paralelo: el flujo interno y el flujo externo, ambos fluyen en la misma dirección.
- Contraflujo: dos fluido se desplazan en la misma dirección pero en sentido opuesto.



- Flujo cruzado: en este tipo de flujo, los fluidos fluyen de forma perpendicular entre sí, es decir un fluido pasa a través de tubos, mientras que otro pasa alrededor de los tubos formando así un ángulo de 90°.

#### Clasificación de intercambiadores según funcionamiento

- Intercambiadores de un solo paso: los fluidos transfieren calor de uno a otro una sola vez.
- Intercambiadores de múltiples pasos: los fluidos intercambian calor de uno a otro más de una vez, esto lo logran utilizando tubos en forma de U a lo largo del bafle.
- Intercambiadores regenerativos: estos intercambiadores utilizan el mismo fluido tanto para enfriar como para calentar.
- Intercambiadores de calor no-regenerativos: utilizan fluidos por separado para calentar y enfriar.

Se sabe que para el CBEI se utiliza un intercambiador de placas planas, esto después de realizar un análisis de los diversos tipos durante la investigación del proyecto IMPULSA 4. El intercambiador de placas planas fue la mejor elección para el tipo de ciclo (iiDEA, 2013).

Como se mencionó anteriormente, las ventajas obtenidas con la selección del intercambiador de placas planas son: la reducción del 30% de tamaño en relación al intercambiador de tubos, la disminución de las incrustaciones de partículas así como el fácil mantenimiento y por último el factor de acercamiento que se modifica del 5% al casi 1% con el cambio de tipo de intercambiador.

### **2.3 Separador**

Es un dispositivo mecánico, cuyo objetivo principal es, como su nombre lo dice, el separar de un fluido la fase líquida de la fase de vapor. A partir de su mecanismo se logra separar el líquido condensado del vapor generado, obteniendo como resultado a la salida del separador, vapor de alta calidad. Los principios de funcionamiento del separador utilizan la fuerza centrífuga y la fuerza de gravedad. Como el líquido es más denso que el gas, adquiere mayor fuerza centrífuga y velocidad, deslizándose por las paredes y descendiendo por las mismas con ayuda de la gravedad, de esta manera se puede separar gas y líquido.



Para obtener un buen resultado se debe tener presente que las fases de los fluidos deben ser inmiscibles y con una densidad diferente para poder llevar a cabo la separación. El separador de flujos es uno de los dispositivos con mayor eficiencia, registrando valores de hasta un 97%.

#### Descripción del proceso de operación

El equipo separador consta de varias secciones, las cuales se describen a continuación:

Sección de separación primaria: el proceso de separación en esta sección, es realizado por medio de un cambio de dirección en el flujo. Dicho cambio se puede generar a partir de una entrada tangencial de los fluidos al separador, o por otro lado se puede instalar una placa desviadora a la entrada del dispositivo. Ya sea con una u otra forma se logra inducir una fuerza centrífuga al flujo, con la que se puede conseguir separar grandes volúmenes de líquido.

Sección de separación secundaria: esta sección es en la cual se separa la máxima cantidad de gotas de líquido de la corriente de gas. El separador debe tener la suficiente longitud para que gotas logren separarse por el principio de gravedad, se debe cuidar que la turbulencia del fluido sea mínima.

Sección de extracción de niebla: para esta sección ya se logró separar el flujo de gas, sin embargo dicho flujo aun contiene pequeñas gotas de líquido que no fueron eliminadas. El dispositivo utilizado en esta sección generalmente es un conjunto de aspas, constituidas por alambre entretrejido o por tubos ciclónicos. En esta parte del separador se utilizan los principios de fuerza centrífuga y efecto de choque, logrando que las partículas de líquido se acumulen formando gotas más grandes, las cuales son dirigidas hacia la sección de acumulación de líquidos.

Sección de almacenamiento de líquidos: por último se tiene la sección en la cual se descarga y almacena el líquido separado. Esta sección debe tener la capacidad de controlar el nivel de líquido dentro del separador, esta instrumentación está formada por un controlador, un indicador de nivel, un flotador y una válvula de descarga. También se debe tener cuidado en la capacidad del separador para soportar ciertas presiones.

Cuando se presenta una mezcla de vapor-líquido, como es el caso del CBEI, se puede clasificar a los separadores de la siguiente forma: (Cabrera, 1986)



Principios de operación:

- Producción: reciben los fluido de la línea general de producción
- Prueba: reciben la producción de una sola sección, con el objetivo de poder medir.

Fases de separación:

- Bifásicos: se utilizan cuando es necesario la separación únicamente de dos fluidos.
- Trifásico: como su nombre lo dice, separa tres diversos fluidos, generalmente son colocados de forma horizontal.

Geometría

- Esféricos: regularmente presentan dificultades al momento de su fabricación, la eficiencia que manejan este tipo de equipos es baja, son muy poco usuales en operaciones que involucran gas y petróleo.
- Cilíndricos

- Horizontales: debido a su mayor área de contacto de superficie, este tipo de separadores liberan más eficientemente el gas, si se compara con un separador vertical.

Algunas ventajas del equipo en mención son: el precio; es un precio más accesible que el separador vertical; la capacidad, por su diseño geométrico cuanta con una mayor área de trabajo; en cuanto a la instalación, esta es fácil.

Sin embargo este tipo de separadores también tienen problemas: si el líquido que se maneja a lo largo del proceso contiene sólidos, este tipo no es el indicado, y por otro lado es mucho más difícil de controlar el nivel de operación que en un separador vertical

- Verticales: dichos equipos son idóneos cuando existen limitantes de espacio, generalmente son utilizados si el intervalo entre el gas y el líquido es alto. Son muy utilizados en operaciones de campo.

Como todo equipo, presenta ventajas y desventajas algunas de estas mismas son: desventajas; la instalación es algo complicada, en cuanto al precio, estos requieren de mayor capital para su adquisición que los separadores horizontales.

Algunas ventajas son: el equipo es recomendable para el manejo de cualquier fluido con partículas sólidas, se vuelve más sencillo el control del nivel del líquido por medio de flotadores, asimismo y debido a su geometría, se logra evitar el fenómeno de revaporización, y se logra un mejor centrifugado, ayudado de la fuerza de gravedad la cual nos ayuda a una efectiva separación del gas-líquido.

En conclusión y para efectos del proyecto se seleccionará un separador de forma vertical.

## 2.4 Placa orificio

Se comenzará por explicar el principio de funcionamiento de la placa orificio. La placa orificio funciona mediante un efecto físico llamado flasheo o evaporación instantánea. En el ciclo CBEI, la evaporación instantánea se localiza justo antes del separador de flujos y después del intercambiador de calor, aprovechando que es el momento donde el fluido de trabajo alcanza condiciones de saturación.

El flasheo es la evaporación total o parcial que es producida cuando una corriente de líquido saturado se somete a una reducción radical de área, el fluido se hace pasar a través de un dispositivo ó válvula de estrangulamiento, con esto conseguimos que la velocidad aumente, una vez que se realizó el aumento de velocidad la presión es disminuida, esto cumple con el principio de Bernoulli, es justo en ese momento cuando el calor sensible de nuestro fluido se convierte en calor latente. Una vez que el fluido ha cruzado la válvula de estrangulamiento se produce un porcentaje de evaporación debido a los cambios de presiones, una vez que se realizó la evaporación se registran pérdidas tanto de calor como de temperatura.

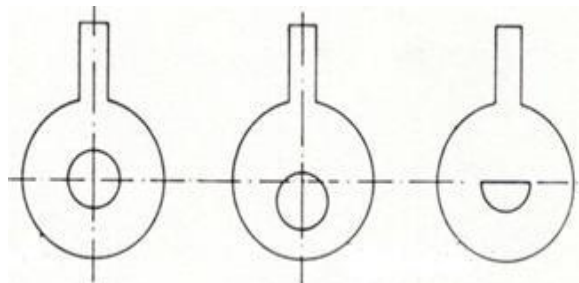


Figura 16 Placa orificio, concéntrica, excéntrica y segmentada (Ingeniería)

Para el CBEI, el flujo que proviene del intercambiador de calor es flasheado, el porcentaje de vapor es redireccionado a la turbina, mientras que el porcentaje que continúa como líquido es llevado al mezclador para después repetir el ciclo. Actualmente no existe mucha fundamentación teórica del flasheo, todo lo que se encuentra son análisis prácticos y experimentales. La evaporación flash es considerada como un proceso con propiedad isoentálpica (entalpía constante), también se le refiere a menudo como un flash adiabático o una expansión de estrangulamiento.

Por último la evaporación flash es utilizada para otros fines como lo es la desalación de agua de mar, el proceso que recorre el agua de mar para la desalación es el siguiente: el agua es calentada y dirigida hacia una evaporación rápida por medio de la caída de presión, donde se logra evaporar algunos destellos de agua, el vapor obtenido se

condensa y se obtiene agua sin sal. Posteriormente el líquido salado residual que quedó es llevado a una nueva cámara de evaporación, esta vez a presión menor que la primer evaporación, nuevamente el vapor obtenido es condensado y se obtiene líquido sin sal, esta operación se puede repetir las veces que se consideren necesarias, en algunos plantas desaladoras cuentan con 24 o más etapas de evaporación (TLV, 2014).

### Base de datos REFPROP

Una vez explicados los equipos que se modificaron del ciclo binario original, es procedente pasar al cálculo de todas y cada una de las propiedades durante los diversos procesos del ciclo. El cálculo de las propiedades se puede lograr por medio de un análisis tipo “Ciclo Rankine”.

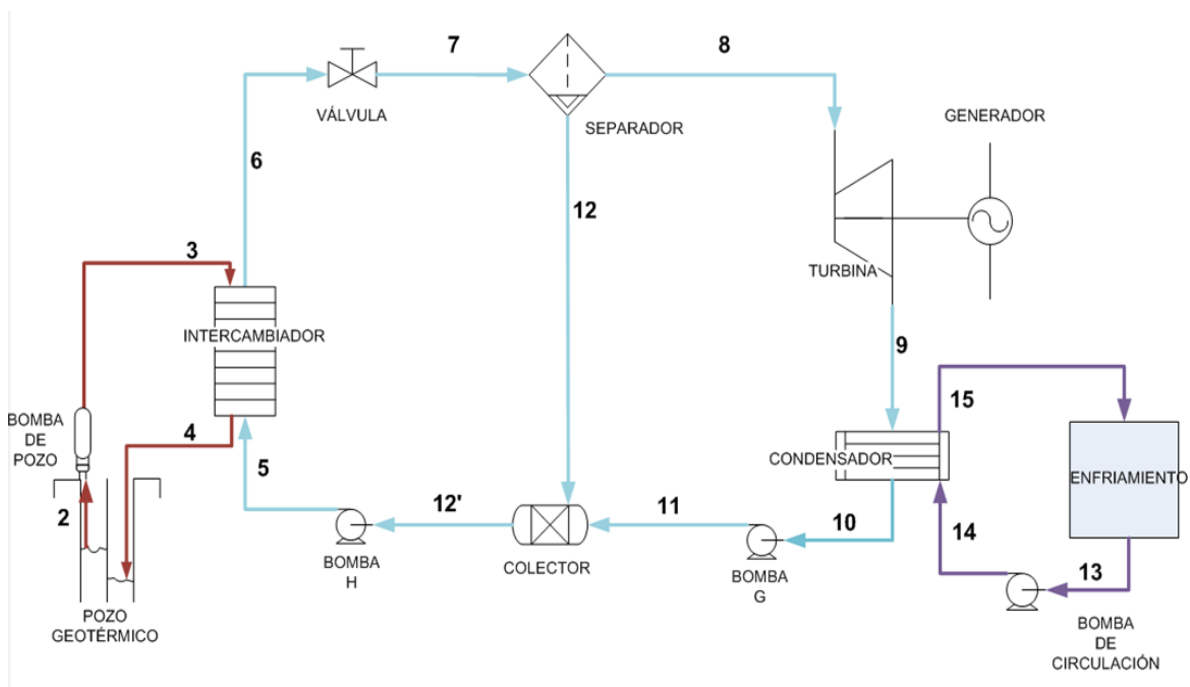


Figura 17 Ciclo CBEI (iiDEA, 2013)

Se debe conocer las propiedades de funcionamiento de cada elemento del ciclo BEI, para ello podremos auxiliarnos del programa REFPROP, mismo que trabaja con una base de datos de tablas de vapor.

Inicialmente se considera un recurso geotérmico con una temperatura de 140°C aunque posteriormente la temperatura del recurso puede ser modificada en el programa

*ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)*



dependiendo las necesidades, posteriormente se supone un gasto másico, el cual determina la potencia total del ciclo. A mayor gasto, mayor potencia.

Teniendo los dos datos anteriores es posible inicial los cálculos del ciclo, se deben calcular las diversas propiedades en cada proceso (presión, densidad, temperatura, entalpia, calidad, etc.) igualmente se deben tomar en cuenta las eficiencias de los elementos del CBEI (turbina, condensador, intercambiador, etc.), con esto se conseguirá un ciclo más real.

En la presente tesis se utiliza el último análisis obtenido en el Grupo iiDEA. En dicho estudio se proponen temperaturas y gastos másicos, con lo cual podemos diagnosticar la potencia neta que se obtendrá del ciclo, esta base de datos toma en cuenta la mayoría mas no todas las eficiencias de los equipos utilizados en el ciclo, las eficiencias que no son consideradas se encuentran actualmente en estudio.

**ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)**



Punto	Recurso geotermico			Fluido de trabajo									Agua de enfriamiento		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12'	13	14	15
T(°C)	140.000	140.008	106.544	103.54377	137.000	107.109	107.109	45.806	45.806	45.810	107.109	103.512	25	25.0035528	35
P(MPa)	0.362	0.412	0.362	0.382	0.332	0.130	0.130	0.010	0.010	0.130	0.130	0.130	0.1	0.15	0.05
Gasto(Kg/s)	0.060	0.060	0.060	0.056	0.056	0.056	0.003179	0.0031786	0.003179	0.0031786	0.053	0.056	0.194	0.194	0.194
Gasto(m³/s)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Densidad(Kg/m³)	926.134	926.155	953.668	955.904	928.789	13.109	0.755	0.075	989.833	989.881	953.133	955.808	924.393	997.069	994.011
Entalpia (KJ/Kg)	589.162	589.216	446.970	434.263515	576.305	576.305	2686.644	2303.827607	191.806	191.927	449.187	434.000	104.918893	104.96904	146.673737
Entalpia Real (KJ/Kg)		589.228		434.321				2361.250		191.954				104.980048	
Calidad(%)	0.000				0.000	0.057	1.000	0.883	0.000		0.000	0.000	0		
Entropia (KJ/Kg)	1.739	1.739	1.380	1.347	1.708		7.271	7.271	0.649	0.649		1.347	0.36719998	0.3672369	
Viscosidad Dinámica [Pa s]				0.00027	0.00020	0.00003	0.00001	0.00006	0.00059	0.00059	0.00001	0.00027			
Carga Térmica(KW)		8.542							6.896						
Potencia Bomba(KW)	0.004			0.018						0.000			0.01		

Datos

Datos de los Equipos	
Eficiencia bomba de pozo %	82
Eficiencia turbina %	85
Eficiencia intercambiador %	93
ΔP del intercambiador (bar)	0.5
Acercamiento de temp Inter°C	3
Eficiencia bomba G %	82
Eficiencia bomba H %	82
Eficiencia Bomba de circulación %	82
Eficiencia del Condensador %	85
ΔP del Separador (bar)	3

Fluidos y Unidades	
Recurso geotermico	water
Fluido de Trabajo	water
Fluido de enfriamiento	water
Unidades	C

Potencia total de bombas	
0.0343	KW
34.2843	W

Eficiencia termica %
11.7

Potencia	
Bruta KW	Neta KW
1.03	1.00





## **Capítulo 3 Ecuaciones fundamentales del flujo en tuberías.**

En este capítulo se realizará un repaso de las fórmulas fundamentales involucradas en el flujo en tuberías. Cuando se realiza un análisis de fluidos se deben considerar sus diversas propiedades; propiedades como la densidad, masa, volumen y viscosidad, entre otras. Factores como velocidad del fluido, área de la tubería y rugosidad de la misma, son factores que intervienen al momento de realizar cálculos de flujo, también se deben considerar las fuerzas que se generan por el movimiento de los mismos fluidos como lo son las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales.

Todos los factores que impiden el libre flujo de los fluidos representan una pérdida, estas pérdidas se pueden y deben cuantificar para poder obtener un óptimo desempeño en nuestro arreglo de tuberías, por otro lado también debe considerarse el material a utilizar, ya que cada material está enfocado para distintas funciones y cada material posee propiedades diferentes.



### 3.1 Flujo en Tuberías

Regularmente se realizan cálculos de ciclos de generación idealizados, esto quiere decir que se desprecian fenómenos que tienen lugar en un ciclo real, estos fenómenos se manifiestan en pérdidas; las pérdidas pueden alterar la eficiencia de los componentes del ciclo y hacen variar nuestros resultados.

Las pérdidas principales que se analizan en ésta tesis son las pérdidas debidas al flujo en tuberías, al tratarse de un fluido en contacto con tuberías, éste experimenta fricciones, cambios de secciones y cambios de direcciones, lo cual resulta en pérdidas de presión a lo largo del ciclo.

Para ello es necesario realizar un repaso del flujo de fluidos en tuberías, el cálculo del flujo en un sistema de tuberías cerrado depende del principio de continuidad, se comienza por recordar el cálculo del flujo volumétrico, el cual es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo (Mott, 2006).

$$Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] = A[m^2] * V \left[ \frac{m}{s} \right] \quad [4. 1]$$

Donde A es el área de la sección y v es la velocidad promedio del flujo. El flujo másico se relaciona con la ecuación anterior de la siguiente forma: Donde  $\rho$  es la densidad del fluido.

$$\dot{M} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad [4. 2]$$

El método que se debe seguir para el cálculo de la velocidad en un sistema de ductos cerrados es conocido como el principio de continuidad. Para poder aplicar este principio se debe contar con un flujo volumétrico constante entre la sección 1 a la sección 2, esto es conocido como flujo estable, por lo tanto el flujo  $M_1$  debe ser igual al flujo  $M_2$ .

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 \quad [4. 3]$$



La ecuación anterior es conocida como la “ecuación de continuidad” y se utiliza para relacionar; densidad, velocidad y área de flujo entre dos secciones. Esta fórmula es válida para todo tipo de fluidos ya sean gases o líquidos. Si el fluido a analizar es un líquido incompresible se puede eliminar la densidad de ambos lados de la fórmula, ya que la densidad será igual a la entrada que a la salida.

Siempre que se analice un problema de flujo en tuberías se debe considerar tres formas de energía; energía potencial: debida a una elevación en relación con un nivel de referencia, energía cinética: debido a la velocidad, energía de flujo: también conocida como trabajo de flujo y representa la cantidad de trabajo necesario para mover un elemento de fluido a través de cierta sección.

$$EP = gz \quad [4. 4]$$

$$EC = V^2/2 \quad [4. 5]$$

$$EF = P/\rho \quad [4. 6]$$

Se sabe que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, esto se dice en la ley de conservación de la energía, por lo tanto la suma de los tres tipos de energía antes mencionados, dará el valor total de energía en el sistema.

$$E = EF + EP + EC$$

$$E [N * m] = \frac{P}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} \quad [4. 7]$$

Si se considera un elemento de fluido que se mueve de una sección 1 a una sección 2 y si no hay energía que se agregue o pierda, entonces el principio de conservación quedaría como:

$$E1 = E2$$
$$\frac{P1}{\rho} + gz1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P2}{\rho} + gz2 + \frac{V_2^2}{2} \quad [4. 8]$$



La ecuación resultante es mejor conocida como “*la ecuación de Bernoulli*”, cada elemento de la ecuación en comento es una forma de energía que posee el fluido por unidad de masa.

Por otro lado existen varias restricciones para el uso de la ecuación de Bernoulli, a continuación se enumeran:

1. Sólo es válida para fluidos incompresibles.
2. Entre las dos secciones de interés no puede haber dispositivos mecánicos como bombas, motores de fluido o turbinas.
3. No puede haber pérdida de energía por la fricción o turbulencia que generen válvulas y accesorios en el sistema de flujo.
4. No puede existir transferencia de calor hacia el sistema o fuera de éste.

Aunque básicamente ningún sistema satisface dichas restricciones, la ecuación de Bernoulli servirá para análisis posteriores.

Por otro lado un fluido en movimiento presenta resistencia por fricción al fluir por las paredes de una tubería. Parte de la energía contenida en el sistema se transforma en energía térmica, misma que se disipa a través de las paredes de la tubería por donde circula, la magnitud de la transferencia depende de las propiedades del fluido; velocidad del fluido, tamaño de la tubería, acabado de la pared y longitud de la misma tubería.

Asimismo es muy común que encontremos en los arreglos de tuberías elementos que sirven para el control de la dirección y flujo del sistema, los cuales generan turbulencia local en cada elemento lo que ocasiona que la energía se disipe en forma de calor. Siempre que existe una restricción al paso libre del fluido, ya sea un cambio de dirección o velocidad del flujo se presentan las pérdidas de este tipo. Si se trata de un sistema de gran magnitud, las pérdidas debidas a válvulas y accesorios por lo general son pequeñas en comparación con las pérdidas por fricción en las tuberías, es por ello que dichas pérdidas reciben el nombre de pérdidas menores (Mott, 2006).

La velocidad de un fluido al momento de entrar en contacto con las paredes de la tubería cambia radicalmente a cero, esto debido a la condición de no deslizamiento, para contrarrestar esta reducción de velocidad y mantener el equilibrio de flujo másico, la velocidad en la sección media de la tubería tiende a aumentar y como resultado a lo largo de la tubería se obtiene un perfil de velocidades.

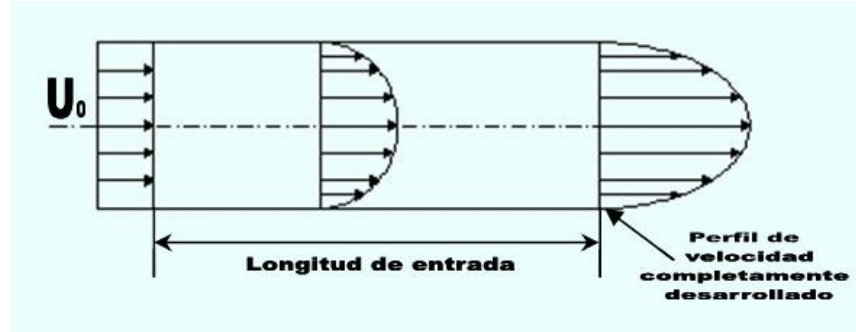


Figura 18 Perfil de Velocidades (Táchira, 2005)

El valor de la velocidad promedio  $V_{prom}$  se determina a partir del principio de conservación de masa:

$$\dot{M} = \rho V_{prom} Ac = \int_{Ac} \rho u(r) dAc \quad [4.9]$$

Las pérdidas de energía que un fluido puede presentar a lo largo de una tubería, depende del comportamiento del flujo, ya sea laminar o turbulento. Osborne Reynolds fue el primer investigador en demostrar que se podía pronosticar cual sería el comportamiento de un fluido si se conocían varios factores como; la velocidad del fluido, el diámetro por el cual es transportado, la densidad y la viscosidad (Mott, 2006).

La transición de flujo laminar a flujo turbulento depende de varios factores; la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido. El régimen de flujo depende de fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el fluido, Osborne Reynolds descubrió esa relación y en la actualidad es llamada “*número de Reynolds*” y se expresa para un flujo interno en una tubería circular como (Cengel, 2006):

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} D}{\nu} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} \quad [4.10]$$

Donde  $V_{prom}$ = velocidad de flujo promedio [m/s],  $D$ = diámetro [m], y  $\nu = \mu/\rho$  viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ], el número de Reynolds es una cantidad adimensional. Cuando se analiza un flujo y éste pasa de un flujo laminar a flujo turbulento, a este estado se le denomina flujo de transición y depende de la rugosidad de la superficie, las vibraciones y las fluctuaciones de flujo, en total tenemos tres distintos tipos de flujo.



Para el flujo en tuberías circulares, generalmente se utilizan parámetros estandarizados;

$$Re \leq 2300 \quad \text{Flujo laminar}$$

$$2300 \leq Re \leq 4000 \quad \text{Flujo de transición}$$

$$Re \geq 4000 \quad \text{Flujo turbulento}$$

Existen diversos parámetros de la velocidad recomendada para el flujo en tuberías, estos parámetros se han determinado por medios experimentales dependiendo del enfoque y la utilización para el cual estén destinadas las tuberías, por medio de variaciones de temperatura y presión. En la literatura se pueden encontrar muchos rangos de velocidades recomendadas dependiendo el autor, estas velocidades están enfocadas en el óptimo funcionamiento de las tuberías, es decir la menor pérdida por fricción dependiendo, como ya lo mencionamos, de la temperatura, presión y flujo másico, con ello se consigue ahorrar material que se convierte en inversión y se logra una mayor eficiencia del arreglo de tuberías.

A continuación se muestran las velocidades que se utilizan en el presente estudio:

Tipo de fluido	Tipo de servicio	Velocidad recomendada [m/s]
Líquido	Equipos de controles térmicos	1.5 - 3
Vapor	Equipos de controles térmicos	30-50

Tabla 5 Velocidades de flujo (Arredondo, 2000)

Éstas son las velocidades propuestas para el ciclo, sin embargo en un futuro se pueden variar dependiendo de las condiciones de operación, esto con el fin de obtener el máximo desempeño y la mayor eficiencia, así como para disminuir lo mayor posible los costos.



### 3.2 Caída de presión

Como consecuencia de las pérdidas por fricción en el flujo en tuberías, se presenta una caída de presión a lo largo del arreglo. La caída de presión está directamente relacionada con la potencia necesaria para que algún ventilador o bomba mantengan su presión. La caída de presión se puede calcular con la siguiente fórmula, relacionando los efectos viscosos, la longitud, la velocidad y el diámetro de la tubería (Cengel, 2006).

$$\Delta P = \frac{32\mu L V_{prom}}{D^2} \quad [4.11]$$

Por lo tanto y debido a que una caída de presión ocasionada por efectos viscosos representa una pérdida, a esta pérdida se le denominará como “*pérdida de presión*”  $\Delta P_L$  para destacar que es una pérdida. Sin embargo la ecuación 4.11 sólo es válida para flujo laminar, por lo tanto si se generaliza ésta pérdida tanto para flujo laminar como turbulento totalmente desarrollados, y su expresión matemática es:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} \quad [4.12]$$

Donde “ $\rho V_{prom}^2 / 2$ ” representa a la presión dinámica y  $f$  es el factor de fricción de Darcy. Dicho factor de fricción fue descubierto por el científico Henry Darcy quien proporciono la mayor aportación al desarrollo de este factor.

Con el cálculo de dicha pérdida podemos instalar bombas con mayor potencia para así revertir el efecto que ocasiona la pérdida por los efectos viscosos dentro de las tuberías. Para las tuberías verticales, inclinadas o de diámetro variable, los cambios de presión debidos a elevación, velocidad o densidad del fluido deben hacerse por medio del teorema de Bernoulli.



### 3.3 Pérdida de carga

Cuando se analiza un sistema de tuberías, la pérdida de carga se expresa en metros columna de líquido, se sabe que una diferencia de presión es  $\Delta P = \rho gh$ , por lo tanto si se despeja a la pérdida de carga, en este caso  $h$ , se obtiene la siguiente expresión matemática llamada “pérdida de carga” ( $h_L$ ):

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad [4.12]$$

La relación entre pérdida de presión y pérdida de carga es una de las relaciones más generales en la mecánica de fluidos y es válida para flujos laminar o turbulento, tuberías circulares o no circulares y tuberías con superficies lisas o rugosas.

### 3.4 Pérdidas mayores (Factor de fricción)

Para el cálculo del factor de fricción dividiremos los tipos de flujo, laminar y turbulento, aunque no es posible deducir el factor de fricción por medio de una fórmula, existen expresiones matemáticas que cumplen con un rango de error mínimo dependiendo del tipo de flujo.

El factor de fricción para condiciones de flujo laminar es función sólo del número de Reynolds, mientras que para el flujo turbulento el factor se vuelve dependiente del tipo de pared de la tubería. Si el flujo es laminar, el factor de fricción se determina a partir de la siguiente expresión:

$$f = \frac{64 \mu}{D V \rho} = \frac{64}{Re} \quad [4.13]$$

Cuando se manejan flujos de tipo turbulentos, se dificulta el cálculo del factor de fricción, dicho factor pasa a ser dependiente de más de una variable. Para el cálculo del factor de fricción se recurre a métodos experimentales.

Es necesario conocer la rugosidad relativa de las paredes internas de la tubería cuando se presenta un flujo turbulento, cada tipo de tubería tiene una rugosidad diferente  $\epsilon$ , y es





necesario dividir la rugosidad entre el diámetro de la tubería, así se obtendrá la rugosidad relativa, la rugosidad relativa forma parte de la expresión matemática que ayuda al cálculo del factor de fricción.

La rugosidad depende del material y el tipo de fabricación, debido a que la rugosidad es algo irregular se toma un valor promedio, el valor de la rugosidad lo proporciona el fabricante, sin embargo con el paso del tiempo la rugosidad se ve alterada por factores como incrustaciones y la corrosión (Mott, 2006).

Se realizaron muchos experimentos donde se graficó el comportamiento del flujo interno de una tubería respecto a la rugosidad, uno de los métodos más utilizados para evaluar el factor de fricción emplea el diagrama de Moody; el diagrama muestra la relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa.

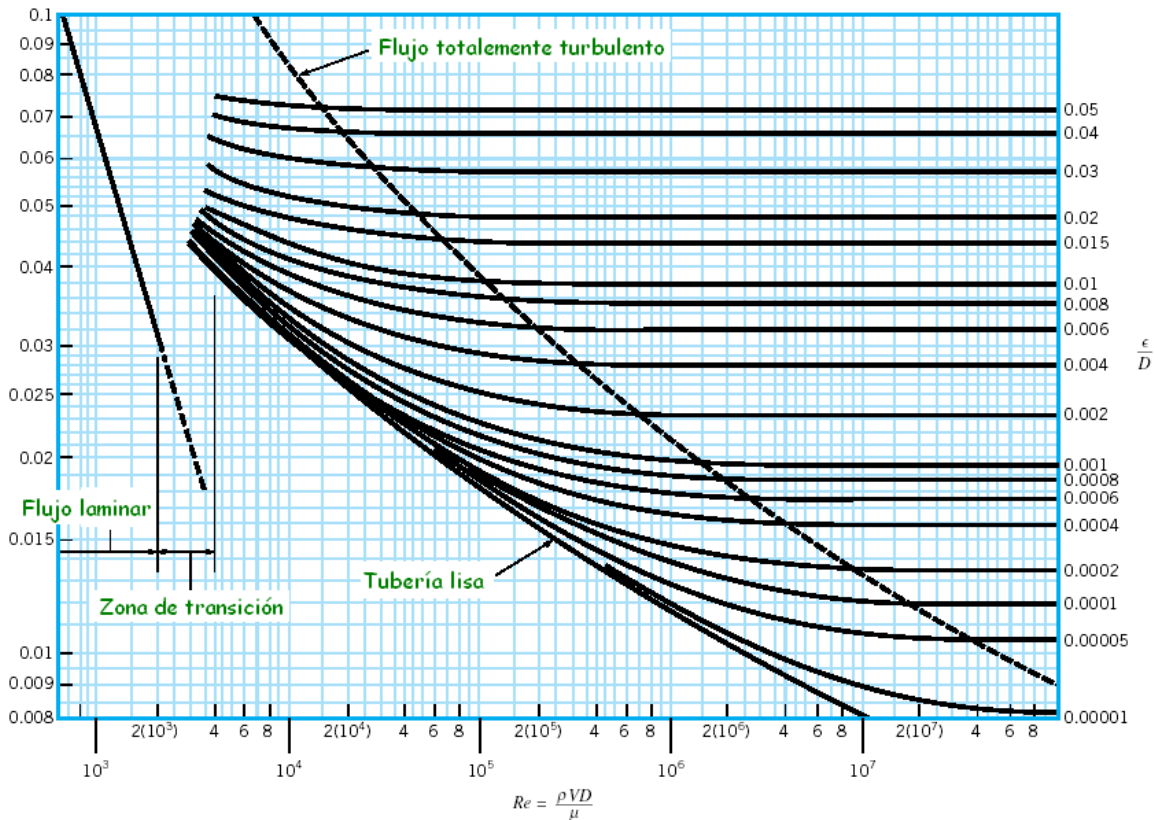


Figura 19 Diagrama de Moody (Corrales)



Existen expresiones matemáticas para el caso del flujo turbulento, son menos precisas que el diagrama de Moody pero son funcionales. En 1939 Cyril Colebrook combino datos disponibles para el flujo en transición y turbulento en tuberías lisas y rugosas en la formula conocida como “*ecuación de Colebrook*” (Cengel, 2006).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad [4.14]$$

También existe una fórmula para el cálculo directo del factor de fricción, ésta fue desarrollada por P.K.Swamme y A.K.Jain, con esto se evita el despeje del factor de fricción de la ecuación anterior. (Mott, 2006). Sin embargo esta expresión matemática está limitada para un rango de rugosidad relativa de 100 a  $1 \times 10^6$  y para números de Reynolds de  $5 \times 10^3$  a  $1 \times 10^8$ , ésta es virtualmente toda la zona turbulenta del diagrama de Moody, obteniendo resultados con un error aproximado del 1%.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7 \left( \frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad [4.15]$$

### 3.5 Pérdidas menores

Cuando se habla de un fluido en un sistema de tuberías, además de la pérdida de carga por fricción, que es considerada una carga mayor, existen otro tipo de pérdidas. El fluido se transporta a lo largo del arreglo de tuberías, pasando a través de uniones, codos, ramificaciones, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones. Dichos componentes o accesorios interrumpen el paso suave del flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del fluido que producen (White, 2008).

Si se compara la pérdida de carga que produce una tubería larga comparada con un accesorio, la pérdida ocasionada por el accesorio es mucho menor, de ahí que este tipo de pérdidas reciban el nombre de “*pérdidas menores*”. Aunque generalmente ésto se cumple, en algunos casos las pérdidas menores pueden ser más grandes que las pérdidas mayores.



Por ejemplo una válvula parcialmente cerrada puede producir una caída de presión mayor que una tubería muy larga. En consecuencia la mayoría de las veces el cálculo de las pérdidas son calculadas experimentalmente por los fabricantes de dichos accesorios. Las pérdidas de carga menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida “ $K$ ” el cual es también llamado coeficiente de resistencia y se define por el siguiente arreglo matemático (Cengel, 2006):

$$K = \frac{h_m}{V^2/2g} \quad [4.16]$$

Como lo mencionamos, el coeficiente de resistencia lo proporcionan la literatura o el fabricante, por lo tanto deja de ser una incógnita, despejando la ecuación, ya que lo que nos importa es el cálculo de las pérdidas de carga, la expresión matemática queda (White, 2008):

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad [4.17]$$

Donde  $h_m$  representa la pérdida menor,  $K$  es el coeficiente de resistencia y  $V$  es la velocidad promedio del flujo en el tubo, en la vecindad donde ocurre la pérdida menor. La magnitud del coeficiente de resistencia depende de la geometría del dispositivo y a veces de la velocidad del flujo.

El fabricante proporciona un coeficiente de resistencia, a continuación se muestra una tabla que contiene coeficientes para diversos accesorios, sin embargo ésta tabla no es general, se recuerda que el factor depende del material y del fabricante.

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)











Piezas	Descripción	Diámetro de los accesorios en pulgadas.											
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24
	Válvula de pie con obturador	11,3	10,5	9,7	9,3	8,8	8,0	7,6	7,1	6,3	5,9	5,5	5,0
	Válvula de pie oscilante	2,0	1,9	1,7	1,7	1,7	1,4	1,4	1,3	1,1	1,1	1,0	0,9
	Codo de 90° radio = 2D	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,20	0,18	0,17	0,16	0,14
	Codo de 45° radio = 2D	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,07
	Contracción asimétrica	$K = 0,5 \left( 1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right) \sqrt{\frac{\theta}{2}}$											
	Válvula de compuerta	0,22	0,20	0,18	0,18	0,15	0,15	0,14	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10
	Válvula de bola	0,08	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
	Válvula de mariposa						0,86	0,81	0,77	0,68	0,63	0,35	0,30

Tabla 6 Coeficientes de resistencia en accesorios (Leon, 2010)

Finalmente se realiza la suma de las diversas pérdidas, los términos en la expresión matemática tanto de las pérdidas menores como de las mayores tiene factores en común, por lo tanto se puede realizar una simplificación de la fórmula para el cálculo total de pérdidas (White, 2008).

$$\Delta P_{total} = h_L + \Sigma h_m = \frac{V_{prom}^2}{2g} \left( \frac{fL}{D} + \Sigma K \right) \quad [4.17]$$



### 3.6 Potencia necesaria

Una vez que se conoce la pérdida de carga total, se debe calcular la potencia de bombeo necesaria para contrarrestar el efecto que ocasiona las pérdidas, esto se determina por medio de la siguiente expresión matemática:

$$\dot{W}_{bomba} = Q \Delta P_L = Q \rho g h_L = \dot{M} g h_L \quad [4.18]$$

Donde  $\dot{V}$  es el flujo volumétrico y  $\dot{m}$  es el flujo másico, el resultado será en Watts.



## **Capítulo 4 Caso de estudio**

Una vez que se tienen los antecedentes adecuados, es procedente pasar al caso de estudio, en este capítulo se propondrá el ensamble del ciclo binario de evaporación instantánea, se modelará por medio de diseño asistido por computadora, esto facilitará tanto la comprensión de la problemática como el fácil manejo de los distintos elementos que conforman el ciclo, con lo cual se ahorrarán recursos ya que no se tendrá que manufacturar los prototipos para la experimentación.

Por otro lado, una vez que se tiene la propuesta de ensamble es posible calcular las pérdidas a las que se encuentra sometida la red de tuberías, se realizó un programa capaz de cuantificar dichas pérdidas. Se sabe que nuestro análisis es una propuesta, por lo que éste programa deberá tener facilidad para adaptarse a cambios en el ciclo.

Asimismo se realizó un análisis de tres diversos materiales para tuberías, se debe tomar en cuenta factores como rugosidad y temperatura máxima permisible. Propiedades mecánicas como temperatura y presión máximas soportadas por cada material, estas propiedades y factora tienen una repercusión directa en las pérdidas.

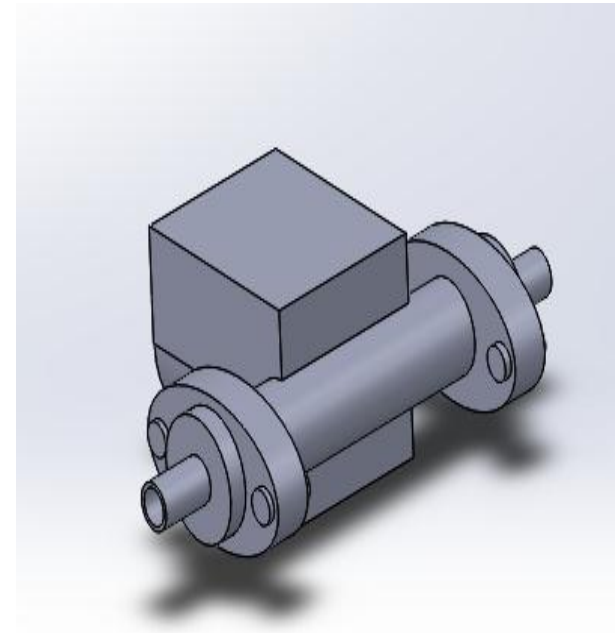
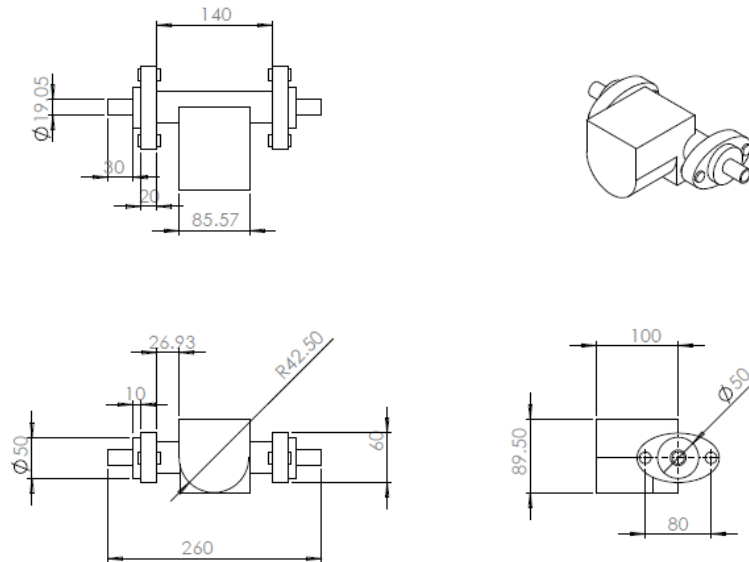


## **4.1 Modelado en tercera dimensión de los elementos del CBEI y sus planos**

La propuesta de ensamble del CBEI se realizará virtualmente, es por ello que debemos realizar los planos y los elementos en 3D por medio del diseño asistido por computadora (CAD), para este fin se utilizará el programa Solid Works.

A continuación se mostrarán los elementos en 3D y sus planos, para una vez que se tengan todos los dispositivos se pueda proceder al ensamble:

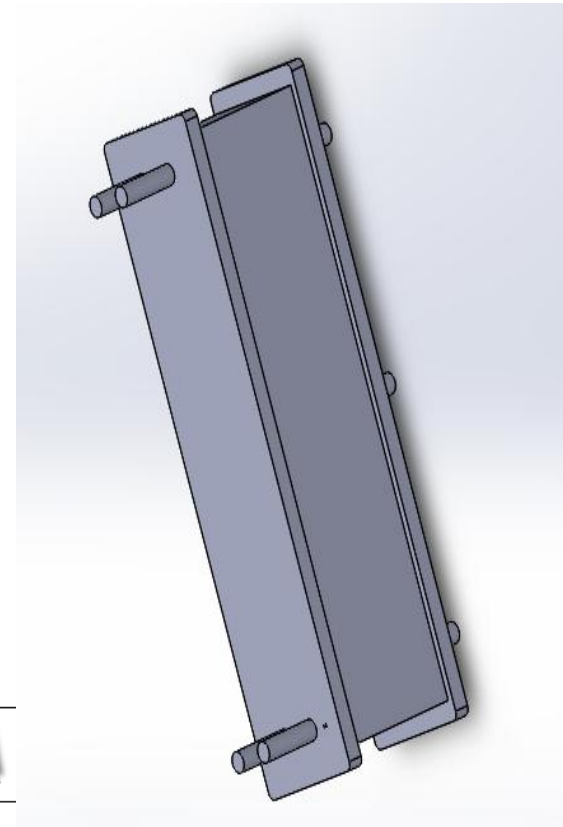
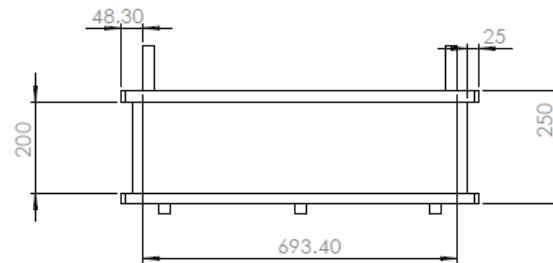
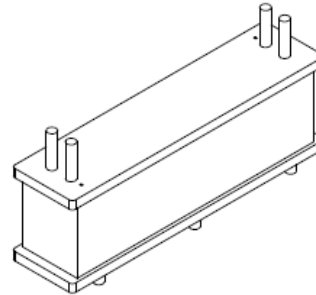
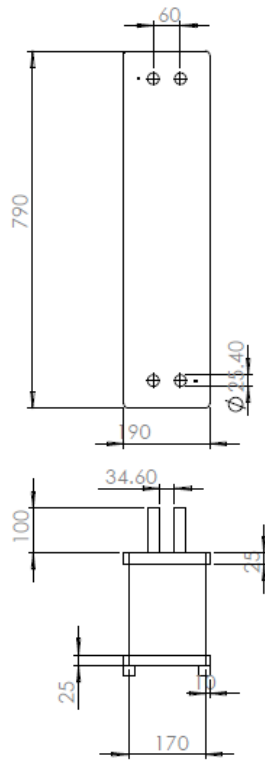
Bomba de recirculación




Plano de la bomba del ciclo PWG				
Diego Gracia García	Rev			
Fecha 30/04/14	Cotas	[mm]	Hoja	



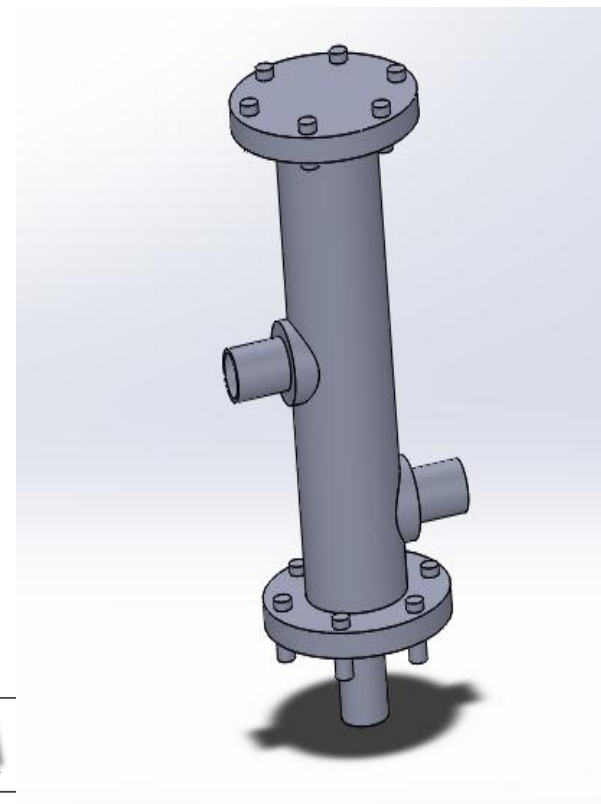
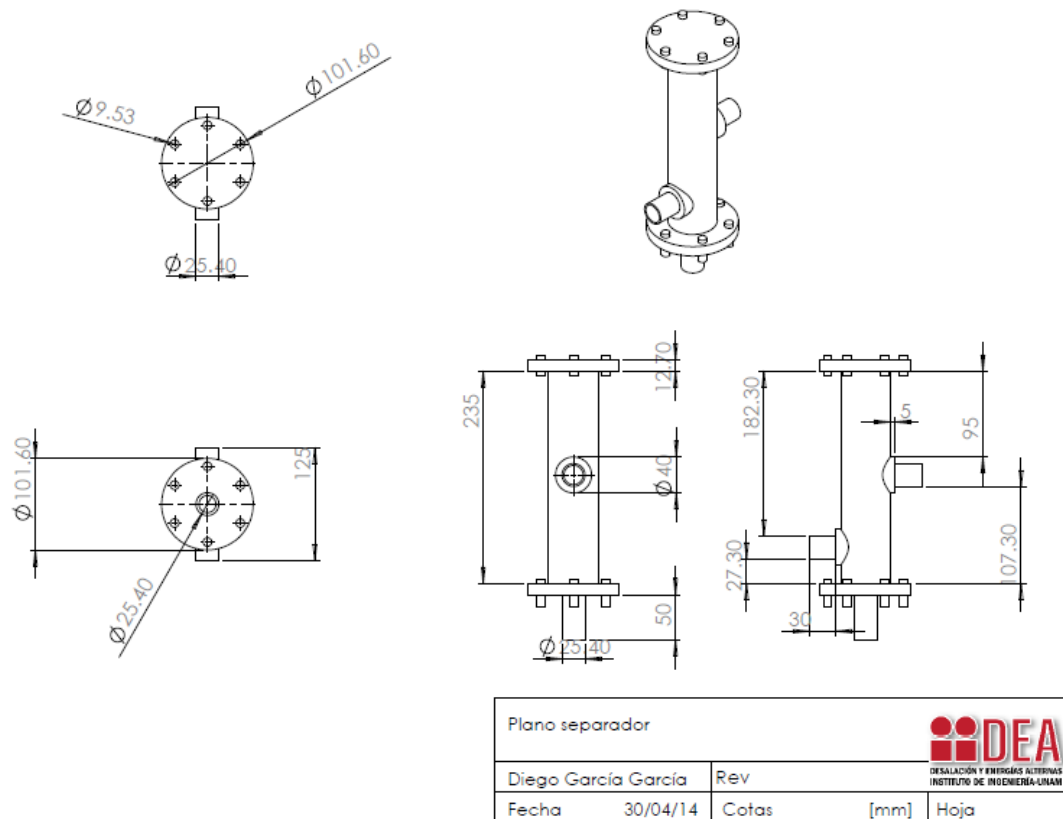
Intercambiador de placas planas



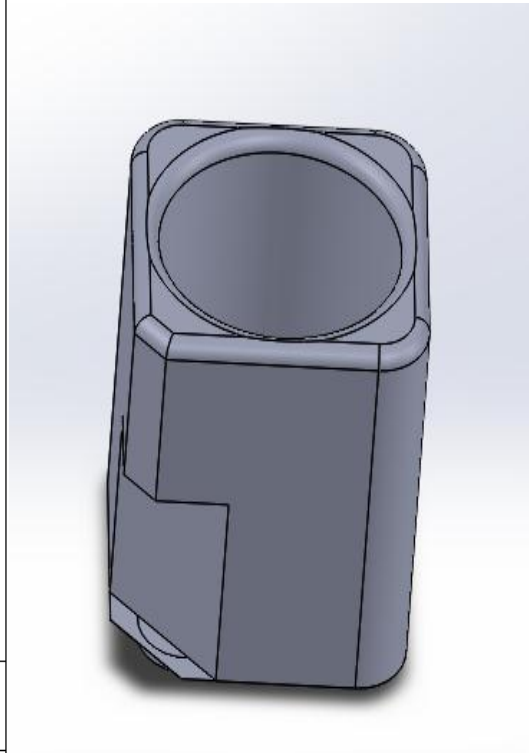
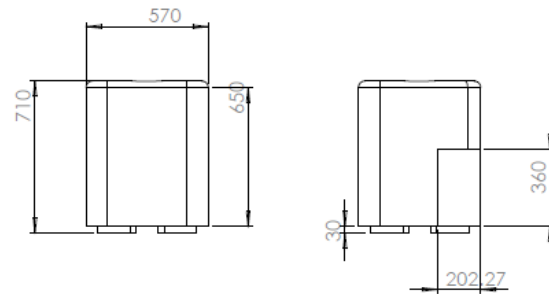
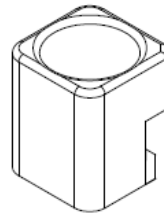
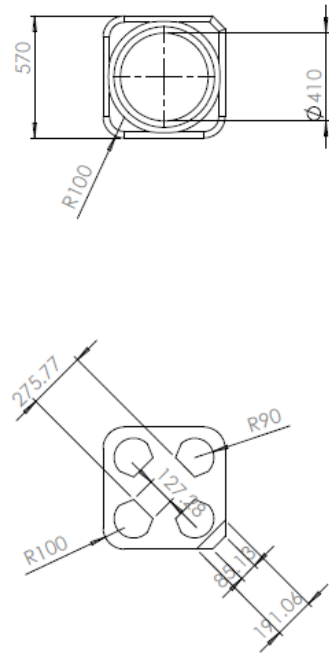
Plano del intercambiador de calor				
Diego García García	Rev			
Fecha	30/04/14	Cotas	[mm]	Hoja



Separador de flujo

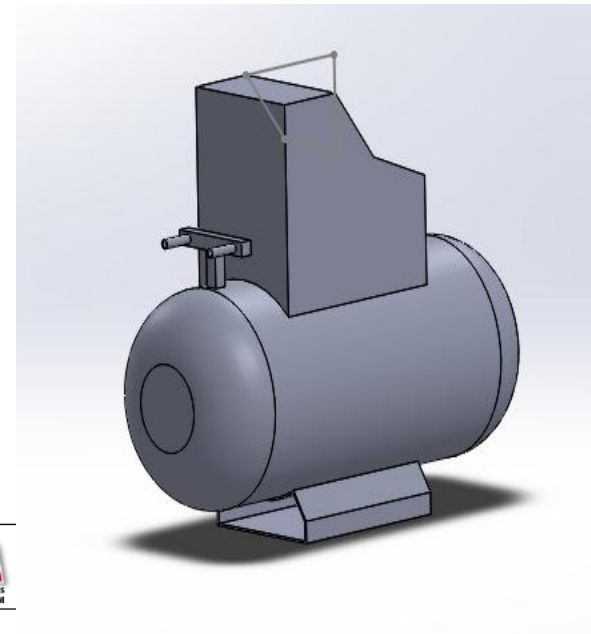
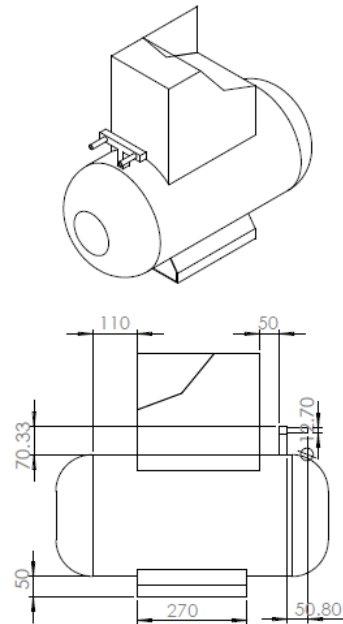
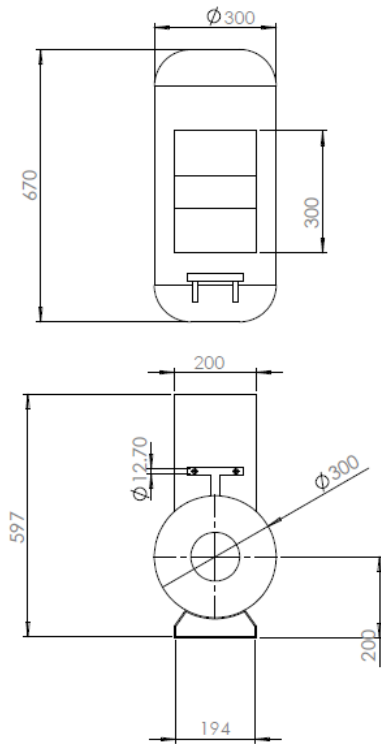


Condensador



Plano del condensador				
Diego García García	Rev			
Fecha	30/04/14	Cotas	[mm]	Hoja

Compresor



Titulo		
Autor	Rev	
Fecha	Escala	

## 4.2 Propuesta de ensamble del CBEI

Una vez que se cuenta con los diseños virtuales de los elementos del CBEI se propuso un ensamble, tratando de lograr los menos accesorios posibles, las menos curvas y cambios de dirección, evitando así pérdidas innecesarias, no se debe olvidar que el propósito de este sistema es que sea de tamaño modular para su fácil transportación.

Una vez que se tiene la propuesta del ensamble, es fácil calcular las longitudes de cada sección y proponer una medida estándar y comercial del diámetro de la tubería. El cálculo de ésta tesis se realizará sin accesorios de medición o de control como son válvulas, termómetros y trampas de vapor.

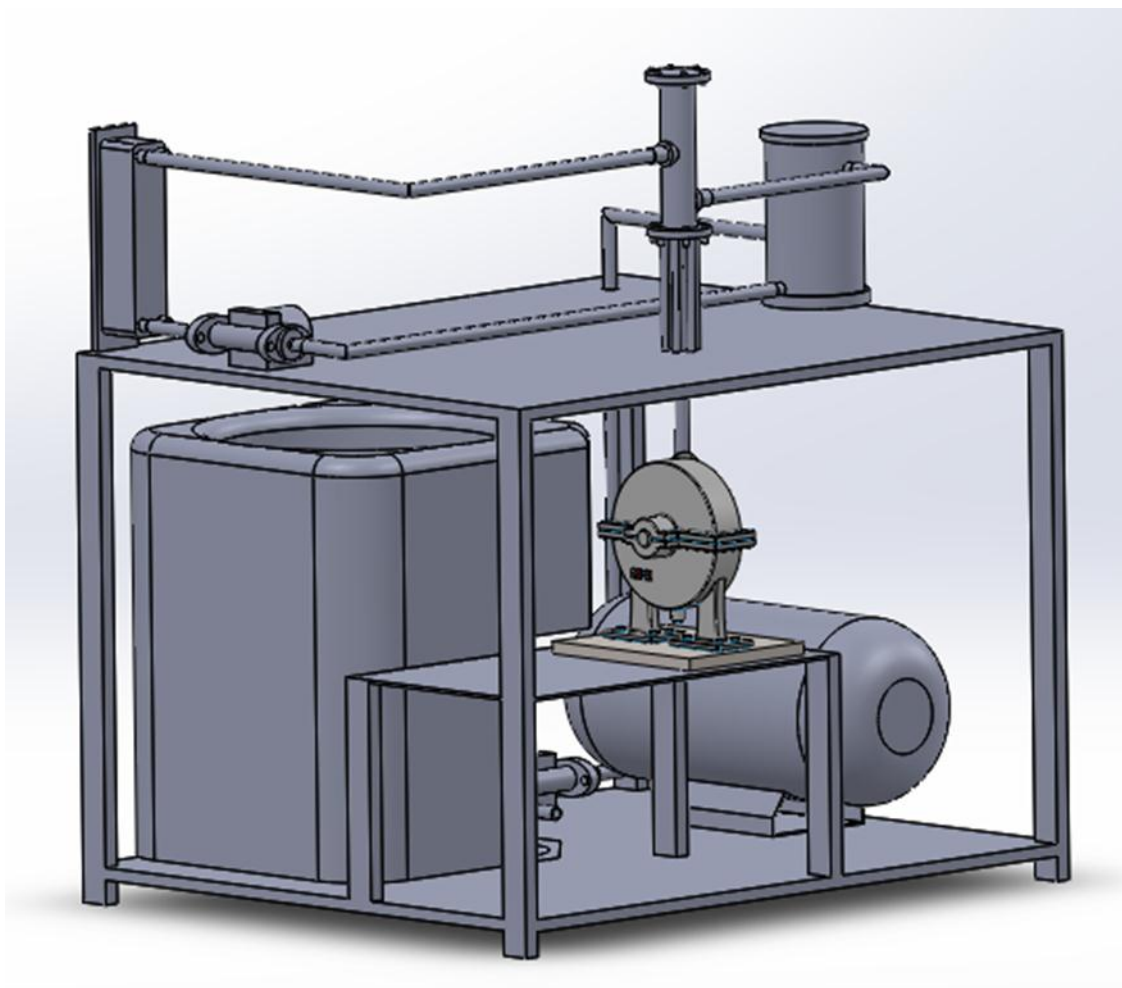


Figura 20 Ensamble del CBEI (iiDEA, 2013)



La ventaja que se tiene al modelar el ciclo con ayuda de Solid Works como anteriormente se mencionó, es que en cualquier momento se puede modificar el archivo en virtual sin necesidad de gastar material y dinero en el prototipo físico.

### **4.3 Programa para el cálculo de pérdidas**

Se realizó un programa, el cual sirve para determinar las pérdidas por fricción a lo largo del conjunto de tuberías del CBEI, el cálculo se realizó por secciones, de componente a componente, esto con el fin de poder calcular la potencia requerida por las bombas del ciclo.

El programa toma en cuenta las pérdidas mayores (a lo largo de las tuberías) y las pérdidas menores (debidas a los accesorios; codos, tees, etc.), también se toman en cuenta las válvulas más comunes para protección de los equipos, sin embargo son accesorios supuestos ya que no se ha realizado el estudio de las válvulas requeridas por cada elemento, dicho análisis está por realizarse en un futuro. Las longitudes fueron obtenidas del ensamble realizado en el programa SolidWorks, dichas longitudes son sumamente necesarias para cuantificar las pérdidas.

Por otro lado, el programa cuantifica la caída de presión y nos proporciona la potencia en Watts que deberá adicionarse a la bomba para mitigar dicha pérdida. El factor de fricción fue medido por medio de la ecuación de Coolebrook, sin embargo todos los factores de la calculadora pueden ser modificados en un futuro si se considera pertinente.



## ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI (CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

BOMBA-INTERCAMBIADOR	INTERCAMBIADOR-VÁLVULA	VÁLVULA-SEPARADOR	SEPARADOR-MEZCLADOR	SEPARADOR-TURBINA
<b>DATOS INICIALES</b>	<b>DATOS INICIALES</b>	<b>DATOS INICIALES</b>	<b>DATOS INICIALES</b>	<b>DATOS INICIALES</b>
diametro 7.04843207 [mm]	diametro 7.150578 [mm]	diametro 13.4588208 [mm]	diametro 6.8552243 [mm]	diametro 13.371243 [mm]
diametro comercial 0.0080115 [m]	diametro comercial 0.008012 [m]	diametro comercial 0.0133405 [m]	diametro comercial 0.0080115 [m]	diametro comercial 0.0133405 [m]
viscosidad dinámica 0.00027152 [kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica 0.000201 [kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica 3.1658E-05 [kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica 1.248E-05 [kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica 1.248E-05 [kg/m <sup>2</sup> s]
densidad 955.304033 [kg/m <sup>3</sup> ]	densidad 928.783 [kg/m <sup>3</sup> ]	densidad 13.1085707 [kg/m <sup>3</sup> ]	densidad 353.13337 [kg/m <sup>3</sup> ]	densidad 0.7545291 [kg/m <sup>3</sup> ]
longitud 0.03 [m]	longitud 1 [m]	longitud 0.21 [m]	longitud 0.434 [m]	longitud 0.4 [m]
gravedad 3.8 [m/s <sup>2</sup> ]	gravedad 3.8 [m/s <sup>2</sup> ]	gravedad 3.8 [m/s <sup>2</sup> ]	gravedad 3.8 [m/s <sup>2</sup> ]	gravedad 3.8 [m/s <sup>2</sup> ]
area de la tubería 5.041E-05 [m <sup>2</sup> ]	area de la tubería 5.04E-05 [m <sup>2</sup> ]	area de la tubería 0.00015263 [m <sup>2</sup> ]	area de la tubería 5.041E-05 [m <sup>2</sup> ]	area de la tubería 0.0001526 [m <sup>2</sup> ]
viscosidad cinemática 2.8405E-07 [m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática 2.17E-07 [m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática 2.415E-06 [m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática 1.303E-08 [m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática 1.654E-05 [m <sup>2</sup> /s]
gasto másico 0.05534748 [kg/s]	gasto másico 0.055347 [kg/s]	gasto másico 0.05534748 [kg/s]	gasto másico 0.0527683 [kg/s]	gasto másico 0.0031786 [kg/s]
flujo volumétrico 5.8528E-05 [m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico 6.02E-05 [m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico 0.00426801 [m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico 5.536E-05 [m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico 0.0042126 [m <sup>3</sup> /s]
temperatura 103.54377 [°C]	temperatura 137 [°C]	temperatura 107.103073 [°C]	temperatura 107.10308 [°C]	temperatura 107.10308 [°C]
presión 0.38188334 [Mpa]	presión 0.331884 [Mpa]	presión 0.13 [Mpa]	presión 0.13 [Mpa]	presión 0.13 [Mpa]
fluido water	fluido water	fluido water	fluido water	fluido water
unidades C	unidades C	unidades C	unidades C	unidades C
velocidad recomendada 1.5	velocidad recomendada 1.5	velocidad recomendada 30	velocidad recomendada 1.5	velocidad recomendada 30
rugosidad 0.0000015	rugosidad 1.5E-06	rugosidad 0.0000015	rugosidad 0.0000015	rugosidad 0.0000015
<b>DATOS SECUNDARIOS</b>	<b>DATOS SECUNDARIOS</b>	<b>DATOS SECUNDARIOS</b>	<b>DATOS SECUNDARIOS</b>	<b>DATOS SECUNDARIOS</b>
vel. Promedio 1.16104385 [m/s]	vel. Promedio 1.134933 [m/s]	vel. Promedio 27.3626653 [m/s]	vel. Promedio 1.0382644 [m/s]	vel. Promedio 27.593341 [m/s]
numero de Reynolds 32746.6641 adim	numero de Reynolds 44176.45 adim	numero de Reynolds 161403.334 adim	numero de Reynolds 672033.25 adim	numero de Reynolds 23263.702 adim
factor de fricción 0.02348566 adim	factor de fricción 0.022047 adim	factor de fricción 0.01701833 adim	factor de fricción 0.0150171 adim	factor de fricción 0.0251503 adim
<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>
0.01814565 [m] de fluido	0.200478 [m] de fluido	10.22725 [m] de fluido	0.0500632 [m] de fluido	28.046358 [m] de fluido
<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>	<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>
cantidad factores K	cantidad factores K	cantidad factores K	cantidad factores K	cantidad factores K
codos 0 0.3	codos 1 0.3	codos 0 0.3	codos 1 0.3	codos 0 0.3
tees 0 0.3	tees 0 0.3	tees 0 0.3	tees 0 0.3	tees 0 0.3
valvula de globo 0 10	valvula de globo 0 10	valvula de globo 0 10	valvula de globo 0 10	valvula de globo 0 10
valvula de bola 0 0.05	valvula de bola 0 0.05	valvula de bola 0 0.05	valvula de bola 0 0.05	valvula de bola 0 0.05
valvula de compuerta 1 0.2	valvula de compuerta 0 0.2	valvula de compuerta 1 0.2	valvula de compuerta 1 0.2	valvula de compuerta 0 0.2
TOTAL 0.01375533 [m] de fluido	TOTAL 0.065566 [m] de fluido	TOTAL 7.37868045 [m] de fluido	TOTAL 0.067634 [m] de fluido	TOTAL 0 [m] de fluido
<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>	<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>	<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>	<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>	<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>
0.03190093 [m] de fluido	0.266044 [m] de fluido	18.2059305 [m] de fluido	0.1177572 [m] de fluido	28.046358 [m] de fluido
<b>CAIDA DE PRESION</b>	<b>CAIDA DE PRESION</b>	<b>CAIDA DE PRESION</b>	<b>CAIDA DE PRESION</b>	<b>CAIDA DE PRESION</b>
238.843363 [Pa]	2421.566 [Pa]	2338.80653 [Pa]	1039.3356 [Pa]	207.33001 [Pa]
<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>	<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>	<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>	<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>	<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>
0.01743084 [W]	0.145868 [W]	3.38204341 [W]	0.0608364 [W]	0.8736602 [W]



ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

<b>TURBINA-CONDENSADOR</b>			<b>CONDENSADOR-BOMBA</b>			<b>BOMBA-MEZCLADOR</b>			<b>MEZCLADOR-BOMBA</b>		
<b>DATOS INICIALES</b>			<b>DATOS INICIALES</b>			<b>DATOS INICIALES</b>			<b>DATOS INICIALES</b>		
diametro	32.81654	[mm]	diametro	1.6503874	[mm]	diametro	1.650347	[mm]	diametro	7.0487864	[mm]
diametro comercial	0.037412	[m]	diametro comercial	0.0060025	[m]	diametro comercial	0.006003	[m]	diametro comercial	0.0080115	[m]
viscosidad dinámica	0.000587	[kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica	0.0005873	[kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica	0.000587	[kg/m <sup>2</sup> s]	viscosidad dinámica	0.0002715	[kg/m <sup>2</sup> s]
densidad	0.07516	[kg/m <sup>3</sup> ]	densidad	389.83328	[kg/m <sup>3</sup> ]	densidad	389.8813	[kg/m <sup>3</sup> ]	densidad	355.80733	[kg/m <sup>3</sup> ]
longitud	0.8	[m]	longitud	0.43	[m]	longitud	0.337	[m]	longitud	0.3	[m]
gravedad	9.8	[m/s <sup>2</sup> ]	gravedad	9.8	[m/s <sup>2</sup> ]	gravedad	9.8	[m/s <sup>2</sup> ]	gravedad	9.8	[m/s <sup>2</sup> ]
area de la tubería	0.001033	[m <sup>2</sup> ]	area de la tubería	2.83E-05	[m <sup>2</sup> ]	area de la tubería	2.83E-05	[m <sup>2</sup> ]	area de la tubería	5.04E-05	[m <sup>2</sup> ]
viscosidad cinemática	0.007814	[m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática	5.334E-07	[m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática	5.33E-07	[m <sup>2</sup> /s]	viscosidad cinemática	2.84E-07	[m <sup>2</sup> /s]
gasto másico	0.003173	[kg/s]	gasto másico	0.0031786	[kg/s]	gasto másico	0.003173	[kg/s]	gasto másico	0.0553475	[kg/s]
flujo volumétrico	0.042231	[m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico	3.211E-06	[m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico	3.21E-06	[m <sup>3</sup> /s]	flujo volumétrico	5.853E-05	[m <sup>3</sup> /s]
temperatura	45.80633	[°C]	temperatura	45.806323	[°C]	temperatura	45.81023	[°C]	temperatura	103.51137	[°C]
presión	0.01	[Mpa]	presión	0.01	[Mpa]	presión	0.13	[Mpa]	presión	0.13	[Mpa]
fluido	water		fluido	water		fluido	water		fluido	water	
unidades	C		unidades	C		unidades	C		unidades	C	
velocidad recomendada	50		velocidad recomendada	1.5		velocidad recomendada	1.5		velocidad recomendada	1.5	
rugosidad	1.5E-06		rugosidad	0.0000015		rugosidad	1.5E-06		rugosidad	0.0000015	
<b>DATOS SECUNDARIOS</b>			<b>DATOS SECUNDARIOS</b>			<b>DATOS SECUNDARIOS</b>			<b>DATOS SECUNDARIOS</b>		
vel. Promedio	36.47205	[m/s]	vel. Promedio	0.1134787	[m/s]	vel. Promedio	0.113473	[m/s]	vel. Promedio	1.1611606	[m/s]
numero de Reynolds	184.1852	adim	numero de Reynolds	1147.3622	adim	numero de Reynolds	1148.001	adim	numero de Reynolds	32744.252	adim
factor de fricción	0.347476	adim	factor de fricción	0.055751	adim	factor de fricción	0.062393	adim	factor de fricción	0.023486	adim
<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>			<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>			<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>			<b>PERDIDA DE CARGA MAYOR</b>		
561.1053 [m] de fluido			0.002624 [m] de fluido			0.00646 [m] de fluido			0.1814353 [m] de fluido		
<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>			<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>			<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>			<b>PERDIDA DE CARGA MENOR</b>		
	cantidad	factores K		cantidad	factores K		cantidad	factores K		cantidad	factores K
codos	2	0.3	codos	0	0.3	codos	2	0.3	codos	1	0.3
tees	0	0.3	tees	0	0.3	tees	0	0.3	tees	0	0.3
valvula de globo	0	10	valvula de globo	0	10	valvula de globo	0	10	valvula de globo	0	10
valvula de bola	0	0.05	valvula de bola	0	0.05	valvula de bola	0	0.05	valvula de bola	0	0.05
valvula de compuerta	1	0.2	valvula de compuerta	1	0.2	valvula de compuerta	1	0.2	valvula de compuerta	1	0.2
TOTAL	151.0305	[m] de fluido	TOTAL	0.0001314	[m] de fluido	TOTAL	0.001314	[m] de fluido	TOTAL	0.0756636	[m] de fluido
<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>			<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>			<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>			<b>PERDIDA DE CARGA TOTAL</b>		
712.1364 [m] de fluido			0.0027554 [m] de fluido			0.007774 [m] de fluido			0.2571655 [m] de fluido		
<b>CAIDA DE PRESION</b>			<b>CAIDA DE PRESION</b>			<b>CAIDA DE PRESION</b>			<b>CAIDA DE PRESION</b>		
524.535 [Pa]			26.728276 [Pa]			75.41327 [Pa]			2408.8473 [Pa]		
<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>			<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>			<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>			<b>POTENCIA NECESARIA DE LA BOMBA</b>		
22.18238 [W]			8.583E-05 [W]			0.000242 [W]			0.141 [W]		

CÁLCULO DE LA PERDIDA DE CARGA TOTAL DEL CICLO PWG	758.8066247	[m] de fluido
CÁLCULO DE LA CAIDA DE PRESION TOTAL DEL CICLO PWG	6980.500606	[Pa]
CÁLCULO DE LA POTENCIA NECESARIA PARA COMPENSAR LAS PERDIDAS EN EL PWG	33.25840351	[W]
PRESIÓN TOTAL REQUERIDA PARA EL CICLO	34.2842727	[W]
PORCENTAJE DE AUMENTO DE PRESION A LAS BOMBAS	97.00776	%





## 4.4 Selección de Material

En la presente tesis no se tomaron en cuenta los esfuerzos a los que se encuentran sometidas las tuberías, esto debido a que las velocidades y los flujos son muy pequeños y pueden despreciarse en el presente trabajo, sin embargo para los trabajos futuros se deberán considerar dichos esfuerzos para obtener resultados más precisos. Únicamente se analizarán las pérdidas referentes a la oposición del fluido a su libre flujo.

Se diseñaron tuberías capaces de transportar el fluido geotérmico y fluido de trabajo a lo largo de todo el ciclo, se calcularon las pérdidas de carga ocasionadas por diversos factores y se calculó la potencia necesaria que deben tener las bombas de circulación para poder subsanar esas pérdidas. También se seleccionó un material que cumplió los requerimientos suficientes para el proyecto.

Para el diseño de las líneas de tubería del ciclo es necesario seguir los siguientes pasos, los cuales son recomendados por la norma de la ANSI:

- Al momento de seleccionar un material para una tubería se debe considerar las propiedades mecánicas y químicas de dicha tuberías, tomar en cuenta las condiciones a las que estará expuesta la tubería; presión, temperatura, viscosidad, etc. Todos los fabricantes cuentan con tablas de información donde proporcionan los valores permisibles para las condiciones de operación.
- Por otro lado se debe tomar en cuenta la facilidad de manufactura, el costo y la disponibilidad en el mercado, estos factores a pesar de ser externos a la funcionalidad de la tubería son muy importantes al momento de seleccionar un material. Recordemos que los valores de operación deben estar muy por debajo de los límites máximos permisibles para cada material. Se analizaron tres diversos materiales, los cuales son los más comunes en el mercado de la manufactura, a continuación se dan a conocer.

### Los polímeros

La tubería de termoplásticos es muy utilizada en la actualidad, en particular la tubería de policloruro de vinilo, mejor conocida como PVC. Una de sus mejor particularidades es la



superficie lisa del interior de la tubería, misma que hace que los fluidos se desplacen de una manera muy favorable incluso en las uniones impidiendo estancamientos.

Por otro lado el fácil manejo de este producto da como resultado una fácil instalación, y así se pueden optimizar tiempo y dinero. Otra ventaja de la tubería de PVC es su peso ligero y sus diversas longitudes disponibles en el mercado. Además si se trata de tuberías las cuales necesitan ser aisladas de corriente eléctrica, los termoplásticos son la mejor opción.

Al comienzo del auge de este tipo de tuberías su unión se realizaba por medio de cemento, sin embargo este método requería constante mantenimiento, era poco eficiente y muy laborioso, sin embargo con el paso del tiempo surgió un sistema de acoplamiento, el cual consiste en un anillo de hule que funciona como empaque, dicho anillo asegura la óptima unión y además absorbe un poco la dilatación que surge cuando la temperatura incrementa.

Sin embargo las tuberías de termoplásticos, en específico la tubería PVC tiene ciertas limitaciones, la más importante debido a que en el CBEI se manejan altas temperaturas, es que el policloruro de vinilo tiende a reblandecer cuando es sometido a incrementos en la temperatura, lo que resulta en una deformación en nuestra tubería por lo que resultaría contraproducente la selección de estos materiales para la operación del CBEI (CORP, 2014).

A continuación se muestra una tabla con los principales tipos de tuberías termoplásticas y su temperatura de operación, lamentablemente ninguna cumple con los requerimientos para el presente estudio.

Polímero material de la tubería	Temperatura	
	Con presión (°F, °C)	Sin presión (°F, °C)
ABS - Acrilonitrilo estireno	100, 38	180, 82
PE- Polietileno	100, 38	180, 82
PVC - Policloruro de vinilo	100, 38	180, 82
CPVC - Cloruro de polivinilo	180, 82	
PB - Polibutileno	180, 82	200, 93
PP - Polipropileno	100, 38	180, 82



Tabla 7 Propiedades de los polímeros (Engineering ToolBox, 2014)

### Tubería de cobre

El elemento Cobre cuya simbología química es “Cu”, es un metal (no ferroso) que tiene ciertas propiedades importantes como lo son la ductilidad, maleabilidad, conductividad térmica y conductividad eléctrica. Propiedades que pueden ser buenas o malas dependiendo de la aplicación que se le dé.

Para el presente caso, las principales ventajas que presentan las tuberías de cobre son; las bajas pérdidas de carga, esto debido a que es fabricado por extrusión en frío, lo cual proporciona un acabo liso, otra ventaja es su resistencia a la corrosión, las tuberías de cobre forman una capa de óxido de tan solo unas micras, la cual sirve como un protector por tiempo indefinido.

Sin embargo el cobre también tiene desventajas, por un lado existe la dilatación de la tubería a relativamente bajas temperaturas, lo que ocasiona modificaciones no previstas en nuestra instalación como son el caso de deflexiones o esfuerzos sobre accesorios, lo cual no es nada benéfico. Por otro lado el coeficiente de dilatación lineal del acero es mucho más bajo que el del cobre (Copper International Association).

Las tuberías rígidas de cobre, tiene muy buenas características para la conducción de los fluidos como ya lo mencionamos, las tuberías de cobre se fabrican en 3 principales tipos, a continuación se proporcionan sus medidas comerciales:

Medida nominal	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor de pared	Peso
Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Lb/pie kg/m
1/4´ 6.35 mm	0.375´ 9.25	0.325´ 8.25	0.025´ 0.635	0.107 0.159
3/8´ 9.5 mm	0.5´ 12.7	0.450´ 11.4	0.025´ 0.635	0.145 0.216
1/2´ 12.7 mm	0.625´ 15.8	0.569´ 14.4	0.028´ 0.711	0.204 0.304
3/4´ 19mm	0.87´ 22.2	0.81´ 20.5	0.032´ 0.812	0.328 0.488
1´ 25 mm	1.12´ 28.575	1.05´ 26.7	0.035´ 0.889	0.465 0.693

Tabla 8 Tubería tipo M (Engineering ToolBox, 2014)



Medida nominal	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor de pared	Peso
Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Lb/pie kg/m
1/4´ 6.35 mm	0.375´ 9.5	0.315´ 8	0.03´ 0.762	0.126 0.187
3/8´ 9.5 mm	0.5´ 12.7	0.430´ 10.9	0.035´ 0.889	0.198 0.295
1/2´ 12.7 mm	0.625´ 15.8	0.545´ 13.8	0.04´ 1.01	0.285 0.424
3/4´ 19mm	0.87´ 22.2	0.78´ 19.9	0.045´ 1.14	0.455 0.678
1´ 25 mm	1.12´ 28.575	1.02´ 26	0.05´ 1.27	0.655 0.976

Tabla 9 Tubería de cobre tipo "L" (Engineering ToolBox, 2014)

Medida nominal	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor de pared	Peso
Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Pulgadas Milímetros	Lb/pie kg/m
3/8´ 9.5 mm	0.5´ 12.7	0.402´ 10.2	0.049´ 1.24	0.145 0.216
1/2´ 12.7 mm	0.625´ 15.8	0.527´ 13.3	0.049´ 1.24	0.204 0.304
3/4´ 19mm	0.87´ 22.2	0.74´ 18.9	0.065´ 1.651	0.328 0.488
1´ 25 mm	1.12´ 28.575	0.99´ 25.2	0.065´ 1.651	0.465 0.693

Tabla 10 Tubería tipo "K" (Engineering ToolBox, 2014)

### Acero

Las tuberías de acero son muy populares debido a sus propiedades físicas, existen muchos tipos de tubería de acero, sin embargo todas se clasifican según el espesor de sus paredes, este estándar lo proporciona la API (American Petroleum Institute) y lo nombra "Schedule", mejor conocido en México como "Cédula".



El Schedule está relacionado con la presión nominal de la tubería siendo un total de once “cédulas”, comenzando por la 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120 hasta el Schedule 160, los números más grandes indican un espesor mayor de pared, mientras que el diámetro exterior permanece constante. Para tuberías de diámetro nominal 150mm y menores, el Schedule 40 es el más recomendado por ser el más ligero (Spirax, 2014).

Diámetro nominal			Schedule	Espesor de la pared		Peso kg/m
Interior	Exterior			Pulgadas	Milímetros	
Pulgadas	Pulgadas	Milímetros				
3/8´	0.675	17.1	40	0.091	3.2	0.84
			80	0.126	2.77	1.1
1/2´	0.84	21.3	40	0.109	3.73	1.27
			80	0.147	2.87	1.62
3/4´	1.05	26.7	40	0.113	3.91	1.69
			80	0.154	3.38	2.2
1´	1.31	33.4	40	0.133	4.55	2.5
			80	0.179	3.56	3.24

Tabla 11 Tubería de Acero ASTM A-106 grado b (SAC, 2014)

### Sobredimensionamiento y subdimensionamiento

Cuando se habla de un sobredimensionamiento significa que al realizar el cálculo de tuberías se cometieron errores en el cálculo del diámetro, lo que ocasionará que las tuberías sean; más caras de lo necesario debido al exceso de material que se deberá pagar; se tendrán mayores pérdidas de calor lo cual desencadenara en un mayor volumen de condensado, por ende la calidad del vapor obtenido será menor.

Por otro lado cuando se habla de subdimensionamiento significa que la selección del diámetro de la tubería es menor al necesario, la velocidad aumentará y la caída de presión será mayor, generando una presión menor que la requerida; existirá una disminución de volumen de vapor; y por ultimo al manejar velocidades más elevadas existirá un mayor riesgo de erosión, golpes de ariete, vibración y ruidos. Es por ello que se debe tener un cálculo correcto al momento de diseñar nuestras tuberías para evitar pérdidas en todos aspectos.



## **Capítulo 5 Análisis para dos distintos materiales y resultados**

Anteriormente se dieron a conocer tres diversos materiales para tuberías, sin embargo solo dos cumplieron con los requerimientos del CBEI, los materiales seleccionados para el análisis fueron; cobre y acero.

Por otro lado se realizaron análisis para distintas potencias de ciclo, esto con el fin de observar el aumento o disminución de las pérdidas así como el cambio en los diámetros, todo esto variando los flujos máscicos de fluido geotérmico y la potencia. En este último capítulo se graficaron los resultados, en cuanto a pérdidas con los dos diferente materiales y pérdidas para las diversas potencias.



## 5.1 Cálculo de pérdidas en cobre

A continuación se muestra una gráfica de las pérdidas y caídas de presión utilizando tubería de cobre tipo M como material. El análisis se realizó para cinco distintas potencias, variando el flujo másico del fluido geotérmico; las potencias que se analizaron son 1 kW, 3 kW, 5 kW, 7 kW y 10kW.

Potencia neta KW	Perdidas del ciclo KW	Potencia requerida por el ciclo KW
1	33.2	34.28
3	37.2	102.85
5	71.89	171.4
7	66.43	239.9
10	99.36	342.84

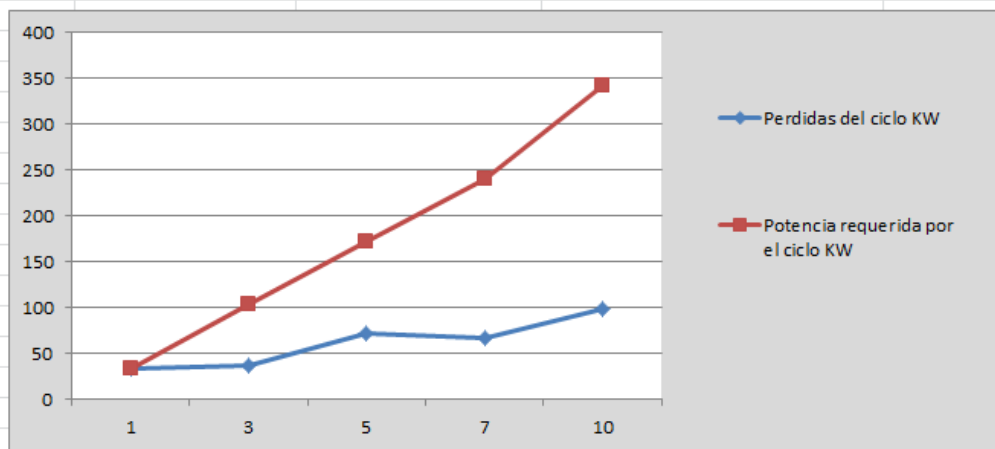


Figura 21 Gráfica de pérdidas en Watts con tubería de cobre.

En la gráfica se observa que las pérdidas crecen mientras se incrementa la potencia, sin embargo porcentualmente son más críticas las pérdidas cuando se trata de un ciclo de baja potencia, mientras que para el ciclo de mayor potencia las pérdidas se hacen cada vez más insignificantes.



Potencia neta KW	Potencia necesaria por las pérdidas %
1	97
3	36.18
5	41.93
7	27.68
10	28.98

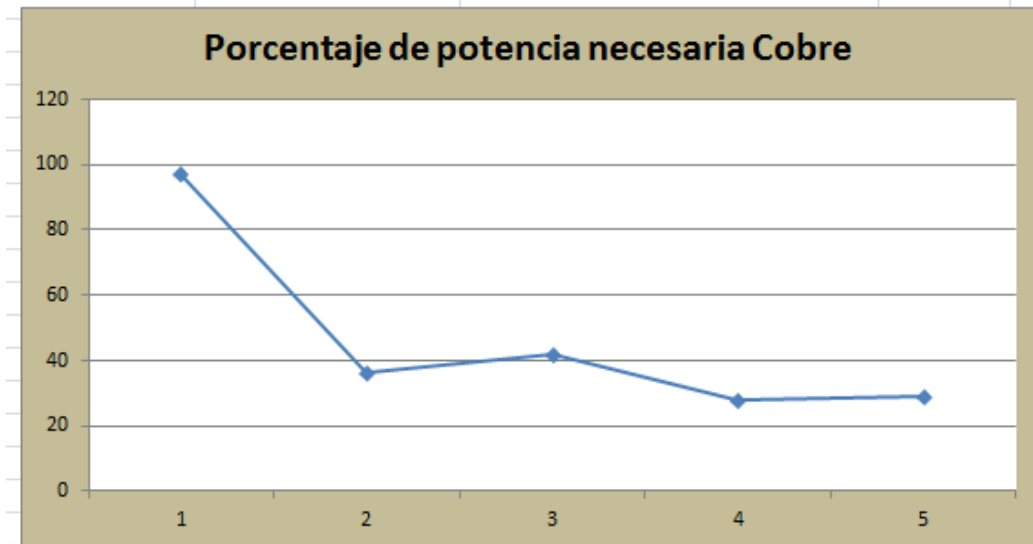


Figura 22 Gráfica de pérdidas en porcentaje con tubería de cobre.

Esto es debido a que el flujo másico en el ciclo de menor potencia es muy bajo y ese es un factor que causa que las pérdidas aumenten ya que las medidas de las tuberías comerciales son sobredimensionadas en comparación con el flujo. Por otro lado si se aumenta la potencia, el flujo másico también aumenta, lo que se traduce en una disminución de pérdidas.

## 5.2 Cálculo de pérdidas en acero

Ahora se muestra la misma gráfica de las pérdidas y caídas de presión pero ahora utilizando acero ASTM-106 cédula 40 como material de las tuberías. El análisis igualmente se realizó para cinco distintas potencias y variando el flujo másico; nuevamente las variaciones de potencia fueron: 1 kW, 3 kW, 5 kW, 7 kW y 10 kW.





ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)

Potencia neta KW	Perdidas del ciclo KW	Potencia requerida por el ciclo KW
1	23.56	34.28
3	31.8	102.85
5	67.43	171.4
7	78.03	239.9
10	79.27	342.84

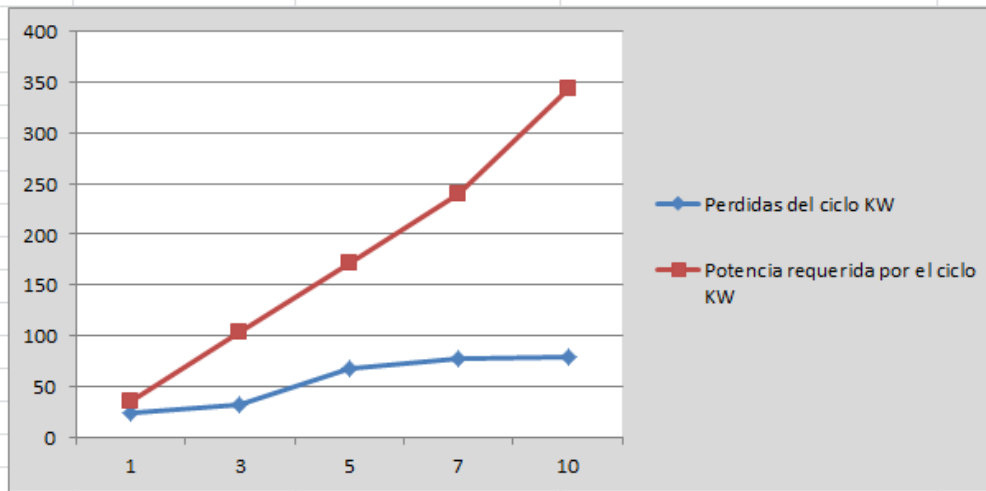


Figura 23 Gráfica de pérdidas en Watts con tubería de acero.

Al igual que en el análisis con cobre, en las tuberías de acero las pérdidas incrementan mientras incrementa la potencia, sin embargo, si comparamos las pérdidas de cobre y las pérdidas de acero, resulta que las pérdidas de acero son menores, aproximadamente un 20%.

ANÁLISIS DEL ACOPLAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL CICLO CBEI  
(CICLO BINARIO DE EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA)



Potencia neta KW	Potencia necesaria por las pérdidas %
1	68.73
3	30.92
5	39.93
7	32.51
10	23.13

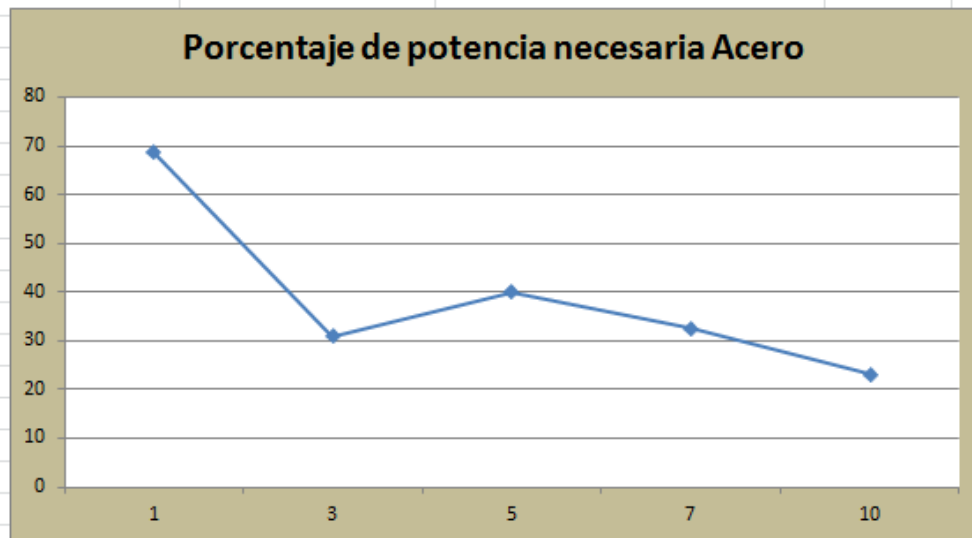


Figura 24 Gráfica de pérdidas en porcentaje con tubería de acero.

Tomando en cuenta los resultados, el material a seleccionar sería el acero, sin embargo se debe considerar la solvencia económica del proyecto, ya que cada material tiene un costo diverso, ese es otro factor que determinará la selección final.



## **Conclusiones**

Inicialmente se realizaron los planos de los elementos del CBEI, con ayuda de los archivos CAD se logró proponer un ensamble que cumple el objetivo de ser modular, por otro lado se logró realizar un análisis termodinámico y conocer las propiedades del ciclo de generación en cada etapa, estos datos son fundamentales para cualquier calculo real relacionado con el ciclo.

Un vez que se tuvieron las dimensiones del ensamble se midieron las distintas longitudes de tuberías, utilizando las longitudes de las tuberías se propuso un área de tubería y una velocidad del fluido. Tomando en cuenta velocidades recomendadas en la literatura, se realizó una iteración para obtener una velocidad promedio y de ahí poder calcular el área. Sabiendo el área de la tubería se realizó una comparación con las dimensiones de tuberías comerciales y se relacionó a la más próxima ascendente.

Teniendo las propiedades de operación del CBEI en los distintos procesos, se procedió al cálculo de las pérdidas en tuberías, para ello se analizaron dos distintos materiales, estos materiales son muy utilizados en el ámbito industrial y son fáciles de adquirir.

Se calcularon las pérdidas primeramente para cobre, el análisis del cobre arrojó graficas que muestran que si el flujo másico del fluido geotérmico es muy pequeño, se tendrán muchas pérdidas, esto debido a que las tuberías comerciales son de un mayor diámetro comparadas con las teóricas ideales para ciclo de flujos pequeños, es por ello que no se consigue llenar correctamente las tuberías y se presentan condensaciones y pérdidas por fricción.

A medida que se incrementan los flujos másicos, las tuberías teóricas y las tuberías comerciales reales comienzan a coincidir, lo cual se refleja en un menor porcentaje de pérdidas, para el presente caso de estudio se analizaron 5 distintas potencias; 1, 3, 5, 7 y 10 kW, finalmente los resultados más óptimos para el material acero, se presentaron en los ciclos de 7 y 10 kW, fue ahí donde se produjeron los menores porcentajes de pérdidas en relación a la potencia utilizada por el ciclo, para ser exactos en el ciclo de 7 kW se registraron pérdidas del 27.68%, mientras que en el ciclo de 10 watts se registraron pérdidas del 28.98%.

Secundariamente se analizaron las tuberías de acero, los resultados fueron similares al análisis del cobre. Cuando se analizaron ciclos de flujo másico pequeño se tuvo el mismo problema, las tuberías no alcanzan el nivel correspondiente y se producen pérdidas, en este



caso los ciclos de producción de 3 y 10 kW fueron los que registraron menores pérdidas con unos porcentajes de 30.92% y 23.13%, como se puede apreciar el ciclo de 10 kW resulto el ciclo más eficiente, estos cambios respecto de cada material se deben a las propiedades de dichos materiales, factores como la rugosidad y los espesores de pared representan cambios en los cálculos de pérdidas.

Finalmente se llegó a la conclusión de que la tubería de acero sería la más conveniente basándonos en los resultados obtenidos en el programa de cálculo de pérdidas. Una vez que se tienen las caídas pérdidas cuantificadas es procedente seleccionar una bomba con la capacidad de contrarrestar las pérdidas en comento, es obvio que entre más grande sean las bombas implicaran un mayor gasto tanto monetario como energético, por lo tanto si se realiza un buen análisis se lograra la optimización del CBEI.

Sin embargo las pérdidas calculadas no son las pérdidas totales o absolutas del CBEI, en un futuro cercano se planea considerar los diversos accesorios necesarios para la protección de los elementos del ciclo y la debida instrumentación para el monitoreo, dichos accesorios no fueron considerados en esta tesis. Actualmente se trabaja en la configuración y selección de los accesorios de seguridad y la automatización de los mismos para que próximamente se puedan incluir en el programa de pérdidas realizado.



## Referencias

- (IDAE), I. p. (2008). *Manual de Geotermia* . Madrid.
- Alvarez, J. M. (2008). *CFE*. Recuperado el 2014
- Arredondo, H. I. (2000). *Principios basicos para el diseño de lineas de vapor*. Medellin, Colombia: Universidad Nacional de Colombia .
- Cabrera, J. A. (1986). *Apuntes de manejo de la produccion en superficie*. México.
- Celestino, D. d. (2009). *Geothermal Resources*. España.
- Cengel, Y. A. (2006). *Mecánica de fluídos*. McGraw-Hill.
- Céspedes, A. (2011). Ventajas y desventajas de los tipos de intercambiadores de calor .
- Components, H. T. (2010). *Heat Transfer Components S.A. de C.V.* Recuperado el 2014, de <http://www.intercambiadoresdeplacas.com/Index.html>
- Copper International Association. (s.f.). *Copper Piping*.
- CORP, A. P. (2014). *AP CORP*. Obtenido de [aetnoplastics.com](http://aetnoplastics.com)
- Corrales, A. D. (s.f.). *Mecánica de Fluidos* . Obtenido de Pérdida de carga en tuberías.
- Dipippo, R. (2005). *Geothermal Power Plants*. Massachusetts.
- Electricidad, C. F. (2012). *Informe Anual 2012*. México.
- Energías como bienes comunes*. (2012). Recuperado el 2014, de <http://www.energias.bienescomunes.org/>
- Engineering ToolBox*. (2014). Obtenido de [www.TheEngineeringToolBox.com](http://www.TheEngineeringToolBox.com)
- Fanelli, M. H. (2004). ¿Qué es la energía geotérmica? .
- Gonzalez, M. A. (s.f.). *Geotermia como alternativa energética en México*. Obtenido de <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/treMiguelGG09.pdf>
- Guillermo, L. T. (Guía de la Energía Geotérmica). Madrid.
- iiDEA. (2013). *Energía Geotérmica*.
- Ingenieria, C. U. (s.f.). *Universidad de Guadalajara*. Recuperado el 2014, de [http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo\\_05/detectores/orificio/](http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo_05/detectores/orificio/)
- Instituto de Geotermia de Madrid España*. (s.f.). Recuperado el 18 de febrero de 2014, de <http://www.igme.es/>
- International Geothermal Association*. (s.f.). Recuperado el 18 de febrero de 2014, de <http://www.geothermal-energy.org/>
- Leon, J. d. (2010). *Manual Técnico "Diseño y cálculo de redes de vapor"*. España.



- Mexicana Asociación Geotérmica. (2007). Recuperado el 2014*
- Mexicana, A. G. (2007-2014). *geotermia.org*. Recuperado el marzo de 2014
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*.
- Pollack, H. N. (1993). *Late Quaternary temperature changes seen in world-wide continental heat flow measurements*.
- Rodríguez, M. B. (s.f.). Review sobre el diseño y la optimización de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza. Santa Clara. Villa Clara, Cuba.
- SAC, T. (2014). *Tubisa*. Obtenido de [www.tubisa.com](http://www.tubisa.com)
- Spirax, S. (octubre de 2014). *spirax sarco*.
- Táchira, U. N. (2005). *UNET Fenomenos de transporte*. Obtenido de <http://www.unet.edu.ve/>
- TLV. (2014). *A Steam Specialist Company*. Obtenido de <http://www.tlv.com/global/US/>
- Vercelli, A. (26 de 05 de 2012). *Energias como bienes comunes*. Recuperado el 12 de 03 de 2014, de <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/06/26/que-es-la-energia-geotermica/>
- White, F. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. España : McGraw-Hill.
- Zarate, E. F. (s.f.). *Propuesta de diseño de un intercambiador de placas para el ciclo PWG*.