



**"UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
DE HIDALGO"**



"FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"

Para obtener el Título de

INGENIERO ELECTRICISTA

TESIS

**ANALISIS DE LA EFICIENCIA TERMODINAMICA
DE LA CENTRAL GEOTERMoeLECTRICA DE LOS
AZUFRES**

Presenta

BENJAMIN SANCHEZ CAMPANUR

Asesor de Tesis

DR. GILBERTO GONZALEZ AVALOS

Morelia, Michoacán, Agosto del 2013

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas han contribuido a la realización de esta tesis y han hecho sugerencias basadas en sus experiencias como profesores o como estudiantes en el salón de clases. También son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer, por su amistad, apoyo, animo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón.

Me gustaría dar las gracias a las siguientes personas por sus comentarios y sugerencias:

A mi Profesor y Asesor de Tesis el Doctor Gilberto Avalos Gonzales quien me motivo para desempeñar este tema, además que me impartió clases durante algunos semestres en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la U.M.S.N.H

Finalmente me gustaría agradecer a mi familia por su paciencia y por su comprensión durante todos estos años.

DEDICATORIA

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer, por su amistad, apoyo, animo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde este o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mi vida, por todo lo que me han brindado y por todo su cariño.

A mis padres, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y por el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final.

Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí, A mis hermanos, abuelos y amigos, Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles. A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

“Cuanto mayor sea el esfuerzo, mayor es la gloria”

RESUMEN

En la presente se estudia el análisis de la central Geotermoeléctrica los Azufres, la evidencia visual del calor de la tierra la proporcionan fenómenos naturales como los volcanes, geiseres, fumarolas, manantiales de agua caliente y las pozas de lodo hirviente. Por lo cual estas manifestaciones se encuentran en varias partes del mundo y con frecuencia se les relaciona con los terremotos, los cuales crean manantiales y tienen sabor, olor bastante desagradable, que hacen recordar el olor a huevo podrido o algo peor.

Enfatizando en dos tipos de plantas Geotermoeléctricas a partir de los recursos de media temperatura. Como etapa subsecuente se describen las diferentes tecnologías de centrales Geotermoeléctricas.

Posteriormente se describen los antecedentes de creación e inicio de generación de las centrales en general, así mismo mostrar el estado actual de los azufres en cuanto a su ubicación, estado físico y estado actual que indica que a la fecha se han perforado más de 80 pozos a profundidades que oscilan entre 600 y 3500 m. Alrededor de 30 de esos pozos se encuentran en producción continua, y tres de ellos en inyección para deshacerse con seguridad del agua separada, como consecuencia de ello también se dar a conocer las características físicas y químicas de los campos geotérmicos, sus tipos de sistemas, partes que lo conforman y realizar una comparación en dos de ellas (flasheo y ciclo binario).

CONTENIDO

Agradecimientos.....	II
Dedicatorias.....	III
Resumen.....	IV
Contenido.....	V
Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tablas.....	X

CAPITULO 1

INTRODUCCION.....	1
1.1 La energía de la naturaleza.....	4
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Metodología.....	6
1.5 Contenido de la tesis.....	6

CAPITULO 2

ANTECEDENTES DE CENTRALES

GEOTERMoeLECTRICAS.....	7
2.1 Bosquejo Histórico.....	7
2.2 Los Azufres, Energía de la Tierra desde el Centro de la Tierra.....	10

2.3 Estado Actual de la utilización Geotérmica.....	14
2.4 Naturaleza de los recursos Geotérmicos.....	16
2.4.1 Máquina térmica de la tierra.....	16
2.5 Tipos de Yacimientos Geotérmicos.....	21
2.6 Exploración Geotérmicas.....	22
2.6.1 Objetivos de la exploración.....	22
2.6.2 Perforación de pozos exploratorios.....	24
2.7 Clasificación de los recursos Geotérmicos.....	26

CAPITULO 3

SISTEMAS RECIENTES DE CENTRALES

GEOTERMoeLECTRICAS.....	29
3.1 Descripción del proceso de una planta Geotérmica.....	29
3.2 Esquemas de una planta Geotérmica.....	20
3.3 Funcionamiento de una Central Geotérmica.....	31.
3.4 Partes de una Central Geotérmica.....	32
3.5 Generación de Energía Geotérmica.....	33
3.5.1 Tipos de Plantas de Generación.....	34
3.6 Aplicación de Energía Geotérmica.....	40

CAPITULO 4

CASOS DE ESTUDIO Y ANALISIS.....	42
4.1 Introducción.....	42
4.2 Localización, Medio Físico y estado Actual de los Azufres.....	43
4.3 Primer caso de Estudio y Análisis.....	46
4.4 Segundo caso de Estudio y Análisis.....	53

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
5.1 Conclusiones.....	58
5.2 Recomendaciones.....	60

BIBLIOGRAFIA.....	63
--------------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

1.1 Diferentes Fuentes Alternas de Energía.....	2
2.1 Laguna cubierta utilizada en la primera mitad del siglo XIX, para coleccionar las aguas calientes y extraer el vapor natural.....	8
2.2 Máquina usada en Larderello en 1904 en la primera experiencia de generación de energía eléctrica mediante vapor geotérmico, con su inventor, el Príncipe Piero Ginori Conti.....	9
2.3 El campo geotérmico Los Azufres es el segundo generador de energía Geotermoeléctrica en México.....	10
2.4 Azufres en la actualidad.....	11
2.5 Ubicación Geográfica de los azufres y de algunas plantas geotérmicas que tienen relevancia en México.....	13
2.6 Evolución de potencia instalada en el mundo (1900-2000). "En 2002 la cifra ha alcanzado los 8.350 MWe".....	15
2.7 La corteza, manto y núcleo de la Tierra. Arriba a la derecha una sección a través de la corteza y del manto superior.....	17
2.8 Perfil esquemático mostrando los procesos de tectónica de placas.....	19
2.9 Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos.....	20
2.9.1 Microfotografía de una inclusión fluida en un mineral hidrotermal (calcita) proveniente del campo geotérmico de Los Hornos, Puebla, México.....	25
3. 1 Existen unidades de 5 MW en la que el vapor, una vez que trabajó en la turbina, se	

libera directamente a la atmósfera.....	30
3.2 En lugar del combustible se encontraría el calor interno de la Tierra.....	31
3.3 Funcionamiento y partes que forman una central geotérmica.....	33
3.4 Esquema de una planta geotérmica de descarga atmosférica.	35
3.5 Esquema de Planta de Flasheo.....	37
3.6 Esquema de una planta geotérmica de condensación.....	39
3.7 Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a su temperatura.....	41
4.1 Ubicación de los principales generadores Geotérmicos en México.....	42
4.2 Localización de Los Azufres.....	43
4.3 Ubicación de pozos Geotérmicos Azufres.....	45
4.4 Diagrama de primer caso de análisis de una planta con dos etapa de flasheo.....	46
4.5 Entalpia vs Presión del pozo AZ_U12.....	47
4.6 Ilustración de características del Pozo AZ_U-12.....	48
4.7 Diagrama del pozo Az_U-18 segundo caso de análisis de una planta binaria básica con condensador.....	53
5.1 Modelo de sistema Geotérmico.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 muestra la capacidad térmica de la clasificación de las plantas geotérmicas....	12
Tabla 2.2 Clasificación de la plantas en capacidad instalada, cantidad de unidades en operación.....	12
Tabla 2.3 Países de producción geotérmica con importante aportación a su sistema.....	15
Tabla 2.4 Países de Geotermia de alta temperatura.....	15
Tabla 2.5. Clasificación de recursos geotérmicos (°C).....	26
Tabla 4.1 Diagrama comparativo en potencia de generación entre las dos plantas de caso de estudio y análisis.....	57

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Hoy en día, en el que el mundo vive una gran crisis energética, debido al aumento del precio del petróleo y de los combustibles nucleares, aunado a los problemas de la contaminación a que su uso conduce, el mundo da todavía mayor importancia a los recursos geoenergéticos, que aunque escasos en muchos países son recursos renovables en nuestro planeta, factor que no se aplican ni al petróleo, carbón o combustibles nucleares.

La Geotermia tiene como significado "Calor de la tierra", por lo que el término energía geotérmica es muy utilizado para indicar la parte de calor de la tierra que podría ser recuperado o explotado por el hombre, los indicadores de estas partes calientes de la tierra son volcanes, fumarolas y manantiales calientes, siendo estos últimos los aprovechados para transformar energía calorífica a energía eléctrica y comenzar así la Generación Geotermoeléctricas.

Los fenómenos estudiados nos han demostrado la importancia que tiene la energía contenida en el interior de la tierra, no sólo como una fuente alterna de energía, sino como el motor que genera los fenómenos geológicos que a través de millones de años han hecho de su superficie lo que hoy podemos observar: cadenas montañosas, valles, volcanes, etc. Pero además, muchas de las riquezas que la tierra contiene están relacionadas directa o indirectamente con este calor.

La necesidad de la transformación de la energía para encontrar satisfactores de las necesidades humanas es la actividad por excelencia, dentro de la coparticipación creadora del ingeniero electricista, por lo cual existen diferentes fuentes alternas de energía como son:

- Energía Eólica
- Energía Geotérmica.
- Energía Solar.
- Energía Hidráulica.
- Energía de Biomasa.
- Energía de Biogás.
- Energía Mareomotriz.



Figura 1.1 Se ilustran las diferentes fuentes alternas de energía

Desde otra perspectiva, la energía Geotérmica es una fuente de energía renovable siempre y cuando el recurso se haga en forma racional (recarga mayor o igual a extracción), además de que es sustentable puesto que cumple con las necesidades actuales de la población sin comprometer a las generaciones futuras.

Los fenómenos estudiados nos han demostrado la importancia que tiene la energía contenida en el interior de la tierra, no sólo como una fuente alterna de energía, sino como el motor que genera los fenómenos geológicos que a través de millones de años han hecho de su superficie lo que hoy podemos observar: cadenas montañosas, valles, volcanes, etc. Pero además, muchas de las riquezas que la tierra contiene están relacionadas directa o indirectamente con este calor.

Es por eso que a lo largo de la tesis se tratará de enfatizar la importancia del estudio de la energía geotérmica y los beneficios asociados con ella. Para esto se han descrito las manifestaciones termales superficiales y se les ha relacionado con los procesos internos. También se ha tratado de establecer su relación con algunos tipos de recursos naturales, como son los depósitos minerales y los campos geotérmicos, de los cuales estos últimos están siendo apenas reconocidos como una fuente alterna de energía. Pero no debe pensarse que el estudio del calor de la tierra tiene que enfocarse solamente a la explotación de esta forma de energía, sino que debe tratarse como una parte esencial en el conocimiento, así como a mejorar las formas regenerativas que se puedan innovar para la mayor obtención de eficiencia, generación de energía y para beneficio de el sistema eléctrico nacional.

Esta tesis pretende proporcionar una guía integrada del estudio de plantas generadoras del tipo geotermoeléctricas, dando especial énfasis al estudio del ANALISIS DE LA EFICIENCIA TERMODINAMICA DE LA CENTRAL GEOTERMoeLECTRICA DE LOS AZUFRES.

1.1 LA ENERGIA DE LA NATURALEZA

Una de las energías que podemos utilizar en las viviendas es la energía geotérmica y es mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. Tiene grandes ventajas, ya que además de que es una energía limpia, una vez que se ha instalado, utilizarla es casi gratuito ya que prácticamente no se le da mantenimiento. La energía geotérmica se puede emplear para la calefacción, refrigeración y agua caliente dentro del hogar.

Uno de los inconvenientes de este tipo de energía es que es poco conocida por promotores y ciudadanos en general “Sería conveniente una mayor difusión de los estudios sobre el subsuelo, de carácter tectónico, de flujos de calor, etcétera, para un mayor conocimiento sobre la geotermia”.

La base para la tecnología del sistema geotérmico para las casas, es un sistema de bomba de calor, que aprovecha las variaciones de temperatura que hay entre el subsuelo y el interior de las viviendas. Para la calefacción, el sistema utiliza el calor del subsuelo y lo lleva hasta la casa. El proceso es a la inversa cuando es necesaria la refrigeración, ya que la diferencia térmica ayuda a refrescar las viviendas. El aprovechamiento de esta energía para calentar el agua, se hace de una manera semejante al que se utiliza para la calefacción.

Las instalaciones geotérmicas tienen alrededor de 20 años de vida, con la prerrogativa de que su mantenimiento es mínimo, ya que no hay combustión como la de una caldera convencional, es limpia, barata y además su desempeño es constante.

1.2 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo de tesis es proporcionar una guía integrada del estudio de plantas generadoras y de los tipos de geotermoeléctricas, dando especial énfasis al estudio del ANALISIS DE LA EFICIENCIA TERMODINAMICA DE LA CENTRAL GEOTERMoeLECTRICA DE LOS AZUFRES. Ya que como es bien conocido que la energía geotérmica es una energía renovable que aprovecha el calor interno de la tierra para poder tener energía eléctrica para cualquier uso, es una de las fuentes de energías renovables y limpia menos conocida pero de las más efectiva.

1.3 JUSTIFICACION

El uso masivo de las energías convencionales procedentes de los combustibles fósiles durante varios años ha sido un gran peligro para el medio ambiente, por lo tanto, millones de emisiones de gases contaminantes de estos combustibles, es justo lo que está provocando el calentamiento global. Por otro lado, los combustibles fósiles no son renovables, y se agotarán hoy o mañana, pero tarde o temprano se acabarán, entonces se necesitan este tipo de energía para poder sostener el desarrollo y crecimiento de las poblaciones de una manera más sustentable. Después de la Segunda Guerra Mundial muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica y la utilización de esta en esos países; en vía de desarrollo muestra una interesante tendencia a través de los años considerándola económicamente competitiva respecto de otras energías porque esta no requiere ser importada y, en algunos casos es la única fuente de energía localmente.

1.4 METODOLOGIA

La metodología utilizada en este trabajo de tesis es la investigación del análisis de alternativas de flujo total y estar documentada toda la información. La mayoría de esta información se obtuvo de libros, artículos, documentales y consultas con el asesor de tesis. Después de exponer varios conceptos y analizar un caso de estudio en específico, se procede a realizar el diseño de propuesta y realizar las comparaciones necesarias para obtener el mejor resultado posible y conveniente.

1.5 CONTENIDO DE LA TESIS

Esta tesis está conformada por 5 capítulos, desarrollada de la forma siguiente.

Capítulo 1. Se presenta una breve introducción, se muestra la situación actual y los antecedentes históricos, así como una breve remembranza de los acontecimientos históricos importantes de las centrales geotermoeléctricas, mismo por último se describe el objetivo y la justificación del mismo.

Capítulo 2 Se pretende estudiar un poco más en los antecedentes de creación e inicio de generación de las centrales, así mismo mostrar el estado actual de la utilización geotermoeléctricas como la naturaleza de los recursos, así mismo se dará a conocer las características físicas y químicas de los campos geotérmicos, por último se pretende introducir de manera general a las ciencias geotérmicas.

Capítulo 3 Se presenta, los sistemas recientes de centrales, descripción del proceso de una planta (en general), así mismo el esquema de la planta (sus partes que lo conforman)

Capítulo 4 Se abordará los casos de estudio, así como el análisis matemático de flujo total, por último se pretende hacer una pequeña comparación entre los resultados del análisis de estudio.

Capítulo 5 Se presentan conclusiones generales, aportaciones y recomendaciones

CAPITULO 2

ANTECEDENTES DE LAS CENTRALES GEOTERMoeLECTRICAS

2.1 BOSQUEJO HISTORICO

Tanto la palabra *Energía* como *Geotérmica* provienen del griego y su significado en castellano es “Fuerza de acción” y “Calor de la Tierra”. El propio nombre de este tipo de energía define su propia forma de ser, y es que la Energía Geotérmica es precisamente eso, la energía que se obtiene a través del calor que emite la Tierra.

Una planta geotermoeléctricas es aquella que utiliza vapor natural, esto es del subsuelo, para alimentar a la turbina de vapor que acciona al generador

La manifestaciones exteriores de la energía como manantiales, geysers, fumarolas, lodos en ebullición, etc. han despertado curiosidades, admiración y avances terror entre la gente. Muchos manantiales termales han sido utilizados en forma de balnearios a través de los siglos a muchos de ellos se han reconocido propiedades terapéuticas debido a los compuestos químicos que ellos se llevan consigo, otra forma de aprovechamiento primitivo es la cocción de alimentos. Posteriormente, han sido aprovechados para la obtener las sustancias químicas que lleva el vapor que este ha tomado de los recursos estrados subterráneos.

El vapor geotérmico se utilizó para elevar líquidos en primitivos elevadores por presión de gas y más tarde en bombas recíprocas y centrífugas y en poleas, todo lo cual fue utilizado en las perforaciones o en la industria local de ácido bórico. Entre 1850 y 1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de la producción de ácido bórico. Entre 1910 y

1940 el vapor de baja presión fue utilizado para calefacción en los invernaderos, edificios industriales y residenciales, en esta parte de Toscana. Otros países también empezaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escala industrial. En 1892 entró en operaciones el primer sistema distrital de calefacción geotermal, en Boise, Idaho (USA). En 1928 Islandia, otro país pionero en la utilización de la energía geotérmica, también inicio la explotación de sus fluidos geotermales (principalmente agua caliente) para calefacción doméstica.

En 1904 se llevo a cabo el primer intento de generar electricidad a partir de vapor geotérmico como se muestra en la figura 2.1; nuevamente, esto tuvo lugar en Larderello.

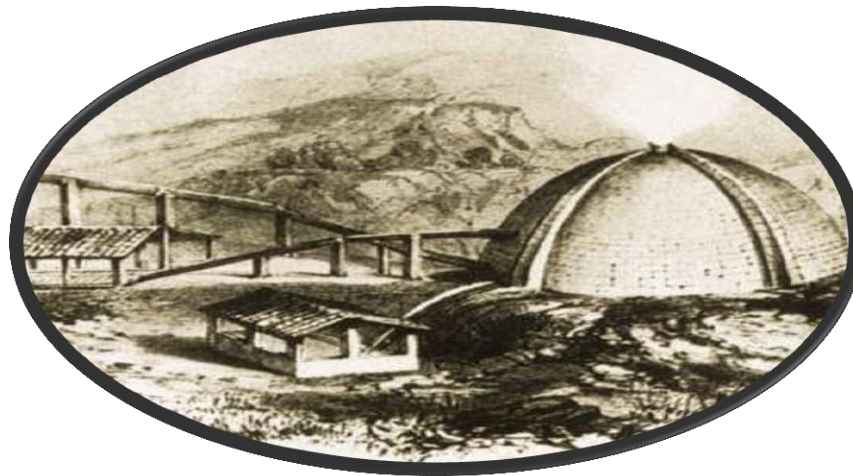


Figura 2.1 Laguna cubierta utilizada en la primera mitad del siglo XIX, para coleccionar las aguas calientes y extraer el vapor natural

El éxito de estas experiencias fue una clara demostración 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 suceso comercial. En 1942 la capacidad geotermoeléctrica instalada alcanzaba los 127.650 Kw pronto, varios países siguieron el ejemplo de Italia; en 1919 los primeros pozos geotermales de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados The Geyser, California, USA, y en el Tatio, Chile. En 1958 entra en operación una pequeña planta geotermoeléctrica, en la figura 2.2

ilustra la primera experiencia de generación en Nueva Zelandia, en 1959 otra en México, en 1960 en USA, seguidos por otros países en los años siguientes.



Figura 2.2 Máquina usada en Larderello en 1904 en la primera experiencia de generación de energía eléctrica mediante vapor geotérmico, con su inventor, el Príncipe Piero Ginori Conti.

Por estos mismos años, en San Francisco California, E.U., se realizaron algunas perforaciones en busca de vapor, después de la segunda guerra mundial, continuo Italia con sus experimentos comenzando en 1945 a funcionar una planta de 15Kw, en 1946 empezó a operar un grupo de 57,500 Kw. A raíz de la recuperación italiana otros países iniciaron investigación al respecto, entre ellos México donde en 1955 se fundó la comisión de Energía Geotérmica.

2.2 LOS AZUFRES, ENERGIA DE LA TIERRA DESDE EL CENTRO DE LA TIERRA.

Construido en abril de 1982, el campo geotérmico Los Azufres es el segundo generador de energía Geotermoeléctrica en México. Treinta años después, el campo no decae y por el contrario se contempla la inversión de 87 mdd para el proyecto Azufres III Fase A y la instalación de una unidad de 50 Megawatts (MW), que estaría lista en 2014. Las manifestaciones termales y el área volcánica de la zona, motivaron en 1972 las exploraciones en el oriente michoacano, explica Alfredo Mendoza, residente de Los Azufres.



Figura.2.3 Construido en abril de 1982, el campo geotérmico Los Azufres es el segundo generador de energía Geotermoeléctrica en México.

En 1975, se efectuaron las primeras perforaciones, y en 1982, al obtenerse vapor se instalaron las primeras cinco unidades generadoras de 5 Megawatts (MW), con lo que

arrancó el proyecto Azufres I. La expansión fue paulatina. En 1989 se instaló la primera unidad de 50 MW, en 1991 otras dos de 5 MW, y en 1994 una más de 5 MW y dos plantas de ciclo binario, adecuadas para fluidos geotérmicos impuros químicamente.

El potencial de la zona motivó en 2003 –cuando fue ‘Obra del mes’- el proyecto Azufres II con cuatro unidades de 25 MW cada una. En total se producen alrededor de 190 MW para llevar luz a Morelia, Acámbaro, Ciudad Hidalgo y al resto del país (10% del total de luz que se produce a través de la geotermia en el país).

Los pozos expiden 15 millones de toneladas de vapor al año y se generan 6 millones de toneladas de salmuera, que es reinyectada al subsuelo o que puede ser empleada para el calentamiento de viviendas, detalla Mendoza, responsable del campo. El residente de estudios, Emigdio Casimiro, explica que al año se invierten en promedio 90 mdp para dar mantenimiento a Los Azufres.

Una parte de los recursos se destina a la reforestación para recuperar los bosques amenazados con la tala clandestina. Enrique Correa, operador de unidades, explica que desde 2003 se trabaja con mecanismos de control para procesos ágiles. Hoy más de 40% del trabajo está semi automatizado, y se coordina desde un centro de mando.



Figura 2.4 Foto ilustrativa de los azufres en la actualidad.

Actualmente la capacidad geotérmica a comparación de las otras fuentes de generación es como se ilustra en la siguiente tabla. 2.1 Siendo los azufres la segunda más importante en el país

Tabla 2.1 muestra la capacidad térmica de la clasificación de las plantas geotérmicas.

Tipo de generación	Capacidad efectiva en MW	Porcentaje
Termoeléctrica	22 678.23	44.05%
Hidroeléctrica	11 266.78	21.88%
Carboeléctrica	2 600.00	5.05%
Geotermoeléctrica	823 .40	1.60%
Eoloeléctrica	86.75	0.17%
Nucleoeléctrica	1 610.00	3.13%
Fotovoltaica	1.00	0.002%
Termoeléctrica (Productores Independientes)	11 906.90	23.13%
Eólica (Productores Independientes)	510.85	0.99%
Total	51 483.91	100%

Posteriormente en la tabla 2.2 se tiene la clasificación de las principales geotermoeléctricas en el país, así mismo su capacidad instalada, cantidad de unidades en operación y finalmente la fecha de inicio que se pusieron en operación.

Tabla 2.2 Clasificación de la plantas en capacidad instalada, cantidad de unidades en operación

Nombre de la central	Cantidad de unidades	Fecha de entrada en operación	Capacidad efectiva instalada (MW)	Ubicación
Cerro Prieto I	5	12-Oct-1973	30	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto II	2	01-Feb-1984	220	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto III	2	24-Jul-1985	220	Mexicali, Baja California
Cerro Prieto IV	4	26-Jul-2000	100	Mexicali, Baja California
Humeros	9	30-May-1991	51.8	Humeros, Puebla
Los Azufres	14	04-Ago-1982	191.6	Cd. Hidalgo, Michoacán
Tres Vírgenes	2	02-Jul-2001	10	Mulege, Baja California Sur

El campo geotérmico los Azufres, con una extensión de 81 km², se localiza en la sierra de San Andrés, dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neo-volcánico Mexicano a 80 km al oriente de la ciudad de Morelia; en la figura 2.5 se muestra la ubicación de los azufres.



Figura 2.5 Ubicación Geográfica de los azufres y de algunas plantas geotérmicas que tienen relevancia en México.

El aprovechamiento del recurso geotérmico para generar energía eléctrica, se inició en agosto de 1982 con la entrada en operación comercial de cinco unidades a contrapresión de 5 MW cada una. Actualmente, la capacidad instalada es de 188 MW, integrados por una unidad a condensación de 50 MW, 4 unidades también a condensación de 25 MW cada una, 7 unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW cada una (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2003).

A la fecha se han perforado más de 80 pozos a profundidades que oscilan entre 600 y 3500 m. Alrededor de 30 de esos pozos se encuentran en producción continua, y tres de ellos en inyección para deshacerse con seguridad del agua separada.

2.3 ESTADO ACTUAL DE LA UTILIZACION GEOTERMICA.

Después de la Segunda Guerra Mundial muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica, considerándola económicamente competitiva respecto de otras fuentes energéticas. Esta no requiere ser importada y, en algunos casos, es la única fuente de energía localmente. Los países que utilizan la energía geotérmica para generar electricidad tienen la capacidad eléctrica instalada en el año de 1995 (6.833MWe), en el 2009 (7.974MWe), y el incremento entre 1995 y el año 2009 es bastante considerable. La capacidad total en México se reporta de carga total instalada a comienzos de 2011 de (9.028MWe). La capacidad instalada en países en vía de desarrollo en 1995 y 2011 representa un 38 y un 47% del total mundial respectivamente.

La utilización de la energía geotérmica en países en vía de desarrollo muestra una interesante tendencia a través de los años. En los 5 años comprendidos entre 1975 y 1979 la capacidad Geotermoeléctrica instalada en tales países aumentó de 75 a 462 MWe); a fines del siguiente período de 5 años (1984) se habían alcanzado los 1.495 MWe ,mostrando una tasa de incremento durante estos 2 períodos de 500% y 223% respectivamente (Dickson y Fanelli, 1988). En los siguientes diez y seis años, de 1984 al 2000, hubo un incremento de casi 150%. La geotermo-electricidad juega un rol bastante significativo en el balance energético de algunas áreas; por ejemplo, en 2001 la energía eléctrica producida mediante recursos geotérmicos representó el 27% de la electricidad total generada en Filipinas, el 12,4% en Kenya, el 11,4% en Costa Rica y el 4,3% en el Salvador, esto indica que el número de países que utiliza en forma directa la energía geotérmica se incrementa desde entonces, como también la capacidad total instalada y la energía utilizada.

A partir de 1973, año de la primera crisis del petróleo se produce la gran expansión en la generación de electricidad con energía geotérmica, incorporándose sucesivamente Japón, Islandia y El Salvador (1975), Indonesia, Kenia, Turquía y Filipinas (1980), Nicaragua (1985), Costa Rica (1995), Guatemala (2000), etc. Para algunos de estos países, la

producción geotermoeléctricas representa una fracción importante de su producción eléctrica total, como se muestran en las Tablas 2.3, 2.4.

Tabla 2.3 Países de producción geotérmica con importante aportación a su sistema.

Filipinas	16,2%
Nicaragua	17,0%
El Salvador	15,4%
Islandia	13,0%
Costa Rica	7,8%
Kenia	5,3%
Nueva Zelanda	5,1%
Indonesia	3,0%

Tabla 2.4 Países de Geotermia de alta temperatura.

PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD (Año 2009) Potencia instalada (MWe):	
Total en el mundo	7.974
EEUU	2.228
Filipinas	1.909
Italia	785
México	755
Indonesia	590
Japón	547
Nueva Zelanda	437

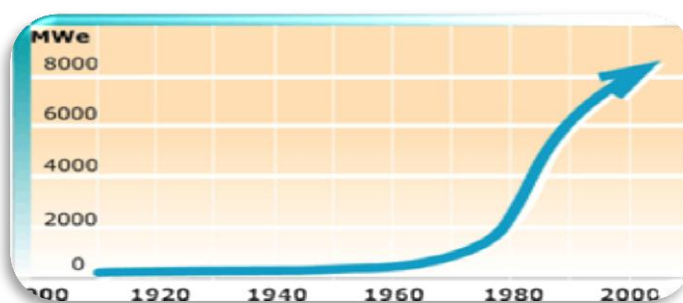


Figura 2.6 Evolución de potencia instalada en el mundo (1900-2000). "En 2002 la cifra ha alcanzado los 8.350 MWe"

2.4 NATURALEZA DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

2.4.1 LA MAQUINA TERMICA DE LA TIERRA

El gradiente geotérmico es el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. A profundidades accesibles mediante perforaciones con tecnología modernas, esto es, sobre 10,000 metros, el gradiente geotérmico promedio es alrededor de 25 a 30 °C/1km. Por ejemplo, a temperatura ambiente media anual de 15°C se puede asumir una temperatura de 65 a 75°C a 2,000 metros de profundidad o a 90° a 105°C a 3,000 metros de profundidad y así para otros miles de metros. Sin embargo, hay regiones de la Tierra en las cuales el gradiente geotérmico es muy diferente al valor promedio. En áreas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante es rellena con sedimentos geológicamente “muy jóvenes”, el gradiente geotérmico puede ser menor que 1°C/km. Por otra parte, en algunas “áreas geotermales” el gradiente es más de diez veces el valor promedio. La diferencia de temperatura entre zonas calientes profundas y zonas superficiales más frías genera un flujo conductivo de calor hacia la superficie, tendiendo a crear condiciones uniformes de temperatura, a pesar que a menudo debido a fenómenos naturales esta situación nunca se alcanza. El flujo calórico terrestre promedio en los continentes y en los océanos es de 65 y 101 mWm⁻² respectivamente; que considerados arealmente entregan un promedio mundial de 87 mWm⁻² (Pollack et al., 1993). Estos valores se basan en 24,774 mediciones en 20,201 sitios que cubren cerca del 62% de la superficie de la Tierra. Estimaciones empíricas basadas en unidades de mapas geológicos permiten hacer estimaciones de flujo calórico en áreas sin mediciones. La publicación más reciente acerca de análisis de flujo calórico es de Pollack et al. (1993).

La Universidad de North Dakota actualmente proporciona acceso vía internet a una actualizada base de datos de flujo calórico, tanto de áreas oceánicas como de áreas continentales. El aumento de temperatura con la profundidad, así como también los volcanes, los geysers, las fuentes termales etc., constituyen la expresión visible del calor en el interior de la Tierra, también este calor origina otros fenómenos que son menos visibles por el hombre; estos fenómenos son de tal magnitud que la tierra ha sido comparada con

una inmensa “máquina térmica”.

De acuerdo a los términos simples estos fenómenos, referidos colectivamente a la teoría "Tectónica de Placas " y su relación con los recursos geotérmicos. Nuestro planeta consiste en una corteza, la cual alcanza un espesor de alrededor de 20 a 65 km en los continentes y alrededor de 5 a 6 km en los océanos, un manto de unos 2,900 km de espesor y un núcleo de aproximadamente de 3,470 km de radio como se observa en la figura 2.7

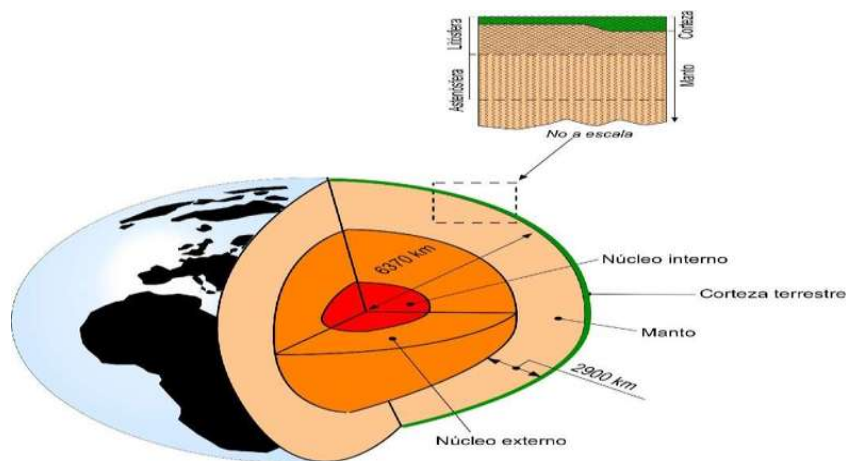


Figura 2.7 La corteza, manto y núcleo de la Tierra. Arriba a la derecha una sección a través de la corteza y del manto superior

Las características físicas y químicas de la corteza, manto y núcleo varían desde la superficie de la Tierra hasta su centro. La envoltura más externa de la Tierra, conocida como la litosfera corresponde a la corteza y al nivel superior del manto, su espesor varía de menos 80 km en las zonas oceánicas hasta sobre 200 km en áreas continentales, la litosfera se comporta como un cuerpo rígido. Bajo la litosfera está la zona conocida como astenósfera, de 200 a 300 km de espesor, la cual tiene un comportamiento menos rígido o más plástico que la litosfera, en otras palabras, a escala geológica en la cual el tiempo se mide en millones de años, esta porción de la tierra se comporta prácticamente, en ciertos procesos, como un fluido. Debido a la diferencia de temperatura entre los distintos niveles de la astenósfera, se han originado movimientos convectivos y posiblemente celdas de convección, hace algunas decenas de millones de años. Su extremadamente lento movimiento convectivo (unos pocos centímetros por año), se mantiene mediante el calor

producido por el decaimiento de elementos radioactivos y por el calor proveniente de las partes más profundas de la Tierra. Grandes volúmenes de rocas calientes profundas, menos densas y más livianas que el material circundante, ascienden con estos movimientos hacia la superficie, mientras que rocas superficiales más pesadas, densas y frías tienden a hundirse, se recalientan y ascienden a la superficie una y otra vez, en forma muy similar a lo que sucede al agua hirviendo en una caldera.

En aquellas zonas donde la litosfera es más delgada y especialmente en las áreas oceánicas, la litósfera es empujada hacia arriba y quebrada por el material parcialmente fundido muy caliente, que asciende desde la astenosfera (zona superior del manto terrestre que está inmediatamente debajo de la litósfera, aproximadamente entre 250 y 660 kilómetros de profundidad.), en concordancia con la rama ascendente de las celdas convectivas (una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas). Este es el mecanismo que originó y aún origina las dorsales oceánicas, que se extienden por más de 60.000 kilómetros debajo de los océanos, emergiendo en algunos lugares (Azores, Islandia) e incluso desplegándose entre continentes, como en el Mar Rojo. Una relativamente pequeña fracción de rocas fundidas que asciende desde la astenosfera emerge en la cumbre de estas dorsales, y en contacto con el agua de mar se solidifica para formar nueva corteza oceánica.

La mayor parte del material que asciende desde la astenosfera se divide en dos ramas que fluyen en dirección opuesta debajo de la litósfera. La continua generación de nueva corteza y el empuje en direcciones opuestas de estas dos ramas provoca que cada lado de la dorsal se separe a una velocidad de pocos centímetros por año. Consecuentemente, la litósfera oceánica tiende a incrementarse. Las dorsales están cortadas perpendicularmente por enormes fracturas que en algunos casos alcanzan unos pocos miles de kilómetros de longitud, denominadas fallas transcúrreres.

Estos fenómenos conducen a una simple conclusión: ya que no hay un incremento de la superficie de la Tierra a través del tiempo, la formación de nueva litósfera a lo largo de las

dorsales y la expansión de la corteza oceánica, debe estar acompañada por una comparable merma de la litósfera en otras partes del globo. Esto realmente sucede en las zonas de subducción, la mayoría de las cuales están representadas por inmensas fosas oceánicas, como aquellas que se extienden a lo largo del margen occidental del Océano Pacífico y de la costa occidental de Sudamérica. En las zonas de subducción la litósfera se pliega y sumerge bajo la litósfera adyacente hasta zonas profundas muy calientes, donde es “digerida” por el manto y el ciclo se reinicia nuevamente. Parte del material litosférico vuelve al estado fundido y puede ascender hacia la superficie a través de facturas en la corteza.

Consecuentemente, se forman arcos magnéticos con numerosos volcanes paralelos a las fosas, en el lado opuesto al de las dorsales. En las fosas localizadas en el océano, como en el Pacífico Occidental estos arcos magnéticos corresponden a cadenas de islas volcánicas; en las fosas ubicadas a lo largo de márgenes continentales, los arcos magnéticos consisten en cadenas de montañas con numerosos volcanes, como en los Andes. La figura 2.8 ilustra este fenómeno.

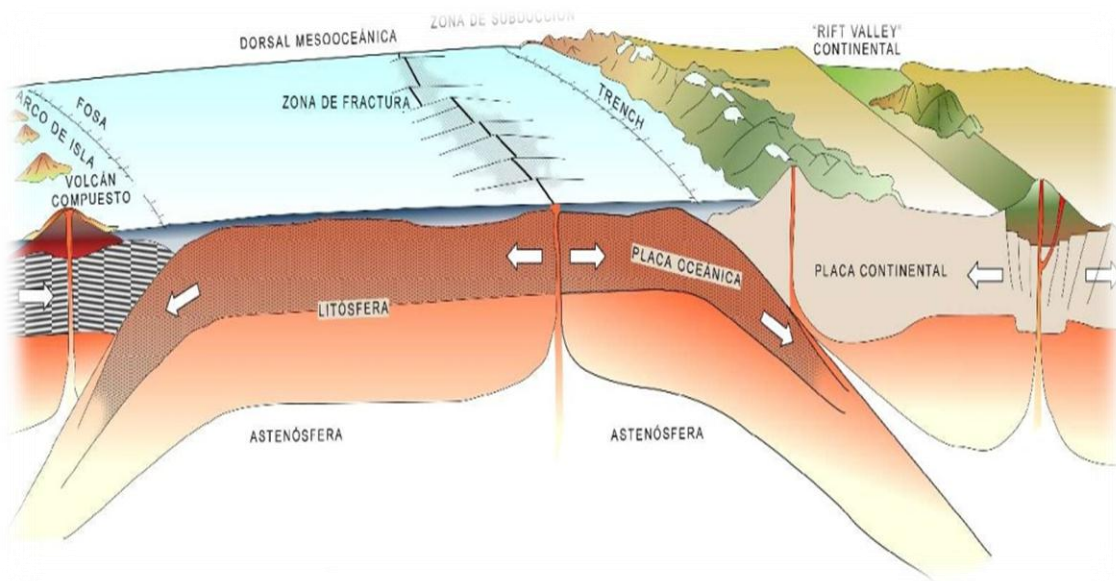


Figura 2.8 Perfil esquemático mostrando los procesos de tectónica de placas

Las dorsales oceánicas, fallas transcurrentes y zonas de subducción constituyen una vasta red que divide nuestro planeta en seis placas o áreas litosféricas de grandes dimensiones

además de varias otras placas más pequeñas (Figura 2.8). Debido a las enormes tensiones generadas por la máquina termal de la Tierra y la asimetría de las zonas que generan y consumen material litosférico, estas placas derivan lentamente unas respecto de otras, cambiando continuamente de posición. Los márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo calórico terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Como se muestra en la figura 2.9, las áreas geotermales más importantes se ubican alrededor de los márgenes de placas.

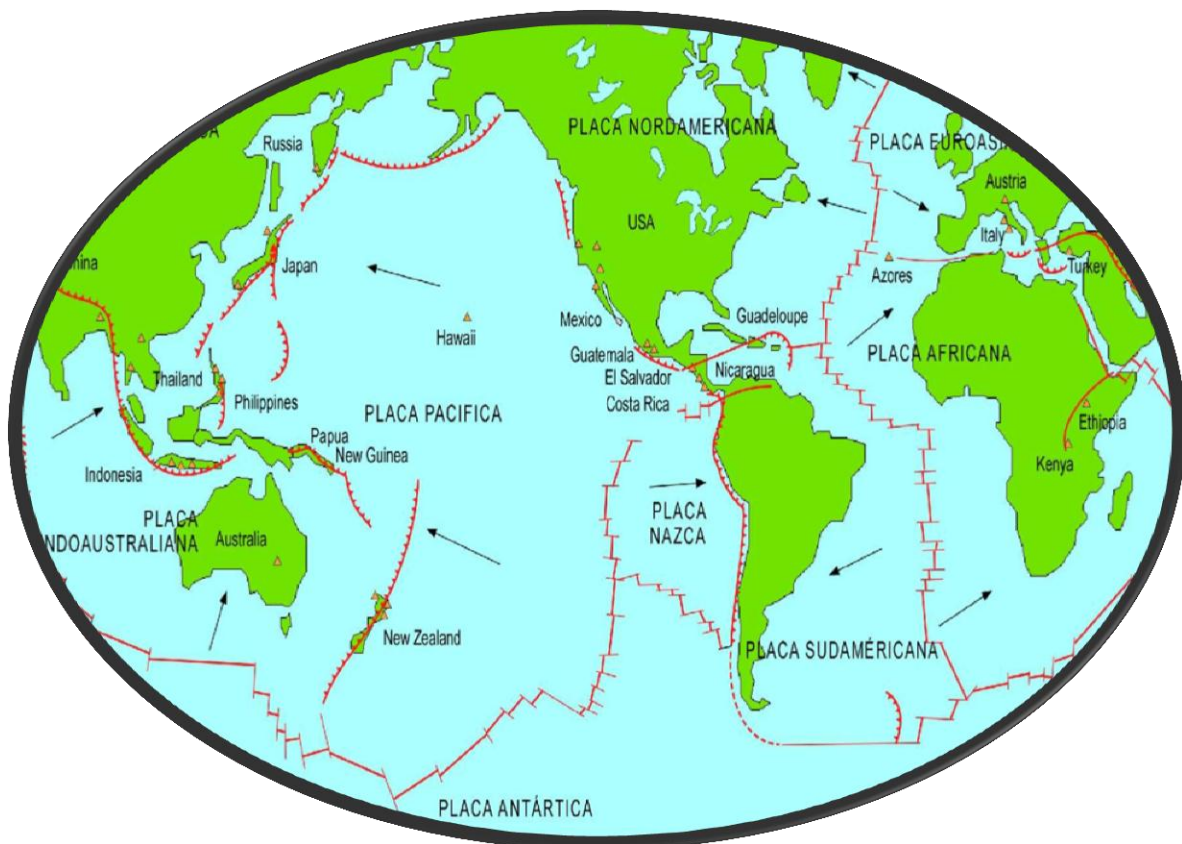


Figura 2.9 Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción:

- 1) Campos geotérmicos que producen electricidad*
- 2) Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes (largas fracturas transversales)*
- 3) Zona de subducción, donde la placa sub-ducida se inclina hacia abajo y se funde en la astenosfera.*

2.5 TIPOS DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

Existen tres tipos según a la temperatura a la que está el agua:

- i. Campo geotérmico de alta temperatura.
- ii. Campo geotérmico de temperatura media.
- iii. Campo geotérmico de temperatura baja y muy baja.

- i. Campo geotérmico de alta temperatura.

La energía geotérmica de alta temperatura existe en las zonas activas de la corteza. Su temperatura está comprendida entre 150 y 400°C. Se requieren varios parámetros para que exista un campo geotérmico: un techo compuesto de rocas impermeables, un depósito de permeabilidad elevada, rocas fracturadas que permitan una circulación de fluidos por la fuente a la superficie, y una fuente de calor magnético, entre 3 y 10 kilómetros de profundidad a 500-600°C.

- ii. Campo geotérmico de temperatura media.

La energía geotérmica de temperaturas medias es aquella en que los fluidos de los depósitos están a temperaturas menos elevadas, normalmente entre 70 y 150°C.

- iii. Campo geotérmico de temperatura baja y muy baja.

La energía geotérmica de baja temperatura es aprovechable en zonas que se encuentran en la corteza terrestre. Los fluidos están a temperaturas de 60 a 80°C.

La energía geotérmica de muy baja temperatura se considera cuando los fluidos se encuentran a temperaturas comprendidas entre 20 y 60°C.

2.6 EXPLORACION GEOTERMICA

La exploración geotérmica es un tema tan extenso que podría ocupar varios libros por sí solos, cada uno dedicado totalmente a una sola rama de las distintas ciencias exploratorias que intervienen. Intentar cubrir el tema entero en una sola sección es casi imposible, puesto que este tema es bastante extenso, pero se recuerda que el objetivo de esta tesis es introducirlo de manera general a las ciencias geotérmicas, mas no instruirlo completamente en ellas. Por lo tanto, no puede intentarse aquí otra cosa que describir muy superficialmente algunas de las técnicas de exploración y sus interrelaciones.

Estas técnicas de exploración se tratarán aquí separadamente bajo cada una de las distintas disciplinas que intervienen; pero se pone de manifiesto que estas disciplinas son independientes. En pocas palabras la exploración geotérmica es un asunto de trabajo en equipo.

2.6.1 OBJETIVOS DE LA EXPLORACION

La importancia relativa de cada objetivo depende de numerosos factores, la mayoría de los cuales están ligados al recurso mismo. Estos incluyen la utilización prevista, la tecnología disponible, los aspectos económicos, como también la situación, localización y tiempo, todos los cuales influyen en el programa de exploración.

Los objetivos de la exploración geotérmica son (Lumb, 1981):

- i. Identificar el fenómeno geotermal
- ii. Averiguar si existe un campo geotérmico utilizable
- iii. Estimar el tamaño del recurso
- iv. Determinar el tipo de campo geotérmico
- v. Localizar las zonas productivas
- vi. Determinar el contenido calórico de los fluidos que serán erogados por los pozos en el campo geotérmico
- vii. Compilar un conjunto de antecedentes básicos con los cuales pueden ser

confrontados los futuros controles.

- viii. Determinar aquellos parámetros ambientalmente sensibles, en forma previa a la explotación
- ix. Tomar conocimiento acerca de algunas características que pudiesen ocasionar problemas durante el desarrollo del campo.

El reconocimiento preliminar de las manifestaciones geotermales tiene mucho mayor importancia en un área remota e inexplorada que en un área bien conocida; la estimación de la magnitud del recurso puede ser menos importante si este va a ser utilizado en pequeña escala, para lo cual se requiere mucho menos calor que el que se descarga naturalmente; si la energía va a ser utilizada para calefacción distrital o para alguna otra aplicación que requiera un bajo grado de calor, entonces no es un objetivo de gran importancia encontrar fluidos de alta temperatura (Lumb, 1981).

Numerosas metodologías y tecnologías están disponibles para alcanzar estos objetivos. Muchos de estos métodos son de uso corriente y han sido ampliamente comprobados en otros ámbitos de la investigación. Las técnicas y metodologías que han sido probadas exitosamente en la exploración de minerales, en petróleo y gas; no necesariamente serán la mejor solución en la exploración geotérmica. En cambio, técnicas de poco uso en la exploración de petróleo podrían ser herramientas ideales en la búsqueda de calor natural (Combs and Muffler, 1973).

2.6.2 PERFORACIÓN DE POZOS EXPLORATORIOS

Una vez que se tiene un modelo preliminar del campo con base en los datos superficiales, se procede a situar un número reducido (de tres a cinco) de pozos exploratorios, con los cuales se pretende corroborar los modelos elaborados y justificar los gastos de la exploración superficial. La restricción en el número de pozos se debe a los altos costos de la perforación, ya que dependiendo de su profundidad y de los tipos de roca que atraviesen (dura o suave) el precio puede variar los costos de perforación. Durante la perforación del pozo se toman muestras de las rocas que se van encontrando. Estas muestras tienen la forma de trozos pequeños de roca que se van cortando con el barreno (muestras de canal) y de cilindros de roca recortados con un barreno especial para este fin (núcleos). Por supuesto que los núcleos proveen de mejor información, ya que se conoce exactamente a qué profundidad corresponden. En cambio las muestras de canal de varias profundidades pueden mezclarse y dar resultados erróneos. Aún antes de terminar el pozo estas rocas son estudiadas para determinar los minerales que se han producido como resultado de la interacción de los fluidos termales y la roca del yacimiento. La formación de los minerales de alteración depende tanto de la composición química del fluido como de la temperatura y por lo tanto estos dos parámetros pueden ser inferidos a partir de las observaciones en las muestras, aún sin haber hecho mediciones directas. Una forma de determinar la evolución térmica del sistema es por medio de pequeñas inclusiones del fluido que quedan atrapadas al formarse los minerales de alteración y que van a conservar la composición del fluido que las formó (Figura 2.9.1). La ventaja de estas inclusiones fluidas es que también se puede determinar la temperatura a la que se formaron: al enfriarse una inclusión el líquido se contrae por lo que queda un espacio donde se forma una burbuja; al calentarla, esa burbuja desaparecerá cuando se alcance la temperatura de su formación. Es así como se pueden determinar variaciones químicas y térmicas que pudieran haber tenido lugar durante la evolución del sistema hidrotermal.

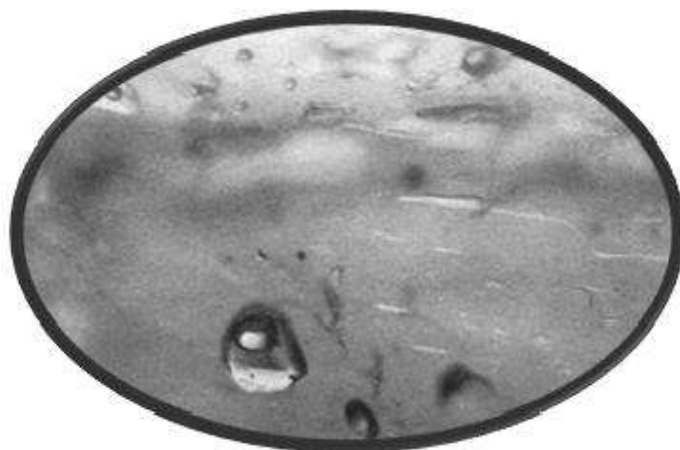


Figura 2.9.1 Microfotografía de una inclusión fluida en un mineral hidrotermal (calcita) proveniente del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. (Escala 1 cm: 0.12 mm)

Una vez que el pozo se ha terminado (lo cual puede llevar varios meses), se toman registros verticales de flujo, temperatura, conductividad y potencial eléctricos, velocidad sísmica, etc., para determinar las propiedades de las rocas que se encuentran a lo largo del pozo y la variación de la temperatura con la profundidad, lo que en forma indirecta ayuda a inferir la permeabilidad de las rocas, ya que después de haber sido enfriadas por los fluidos de perforación las capas de roca más permeables serán las que recuperen más rápido su temperatura anterior por la circulación de los fluidos termales a través de ellas.

Generalmente se deja "reposar" el pozo de unas cuatro a ocho semanas para que se estabilice, comparando las variaciones en los registros de temperatura y presión durante este tiempo. Una vez, estabilizado el pozo se induce su descarga, es decir la emisión continua de fluido, y es sólo entonces cuando se sabe cuánto fluido puede producir el pozo y a qué presión y temperatura, determinando de esta forma la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener. Éste es el parámetro que nos va a indicar la factibilidad económica de la explotación de un campo: cuántos pozos son necesarios para obtener la cantidad planeada de kilowatts eléctricos, lo cual determina finalmente el costo de la electricidad.

2.7 CLASIFICACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

El criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos es, sin embargo, el basado en la entalpía de los fluidos geotermales que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie. La entalpía, puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura, este término se utiliza para expresar el contenido de calor (energía térmica) de los fluidos y da una idea de su “valor”. Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía (o temperatura), de acuerdo con criterios basados generalmente en la energía contenida en los fluidos y en sus posibles formas de utilización.

Un método standard de clasificación y su terminología, podría evitar confusiones y ambigüedades, pero mientras ese método no exista debemos indicar los valores y rangos de temperatura en cada caso; ya que, los términos tales como bajo, intermedio y alto tienen poco sentido y son frecuentemente engañosos. La tabla 2.5 incluye clasificaciones propuestas por varios autores.

Tabla 2.5. Clasificación de recursos geotérmicos (°C)

Autores	Muffler and Cataldi (1978).	Hochstein (1990).	Benderitter and Cormy (1990).	Nicholson (1993).
Recursos de baja entalpía	< 90	<125	<100	≤ 150
Recursos de entalpía intermedia	90-150	125-225	100-200	—
Recursos de alta entalpía	>150	>225	>200	>150

Frecuentemente se distingue entre sistemas geotérmicos de agua o líquido dominante y sistemas geotérmicos de vapor dominante (o vapor seco) (White, 1973). En los sistemas de agua dominante el agua líquida es la fase de fluidos controlados por la presión. Puede

obtenerse algo de vapor en forma de burbujas. Estos sistemas geotérmicos cuya temperatura puede variar de < 125 a > 225 °C, son los de mayor distribución en el mundo.

Dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, estos sistemas pueden producir agua caliente, mezclas de agua y vapor, vapor húmedo y en algunos casos, vapor seco. En los sistemas de vapor, dominante normalmente coexisten agua líquida y vapor en el reservorio, con la fase vapor controlada por la presión. Los sistemas geotérmicos mejor conocidos de este tipo son Larderello en Italia y The Geysers en California; estos sistemas, bastante escasos son de alta temperatura y normalmente, producen vapor seco a sobrecalentado.

Los términos vapor húmedo, seco y sobrecalentado, frecuentemente utilizado, se puede ejemplificar; de un tiesto lleno de agua líquida en el cual la presión puede mantenerse constante a $1 \text{ atm} = 101,3 \text{ kPa}$. Si se calienta el agua, empezará a hervir cuando alcance los 100°C de temperatura (temperatura de ebullición a 1 atm de presión) para pasar de la fase líquida a la fase de vapor. Después de un cierto tiempo el tiesto contendrá líquido y vapor. El vapor coexistiendo con el líquido, en equilibrio termodinámico, es vapor húmedo. Si se continúa calentando el tiesto, manteniendo la presión a 1 atm , el líquido se evaporará completamente y el tiesto contendrá solo vapor. Esto es lo que se denomina vapor seco. El vapor húmedo y el vapor seco se denominan “vapor saturado”. Finalmente, incrementando la temperatura a 120°C y manteniendo la presión a 1 atm , se obtiene vapor sobrecalentado con un sobrecalentamiento de 20°C ; esto es 20°C por encima de la temperatura de evaporización a esa presión. A otras temperaturas y presiones, estos fenómenos también tienen lugar en el subsuelo y se le denomina “tetera de la naturaleza”.(Nicholson, 1993).

Campo geotérmico es una definición de carácter geográfico que usualmente corresponde a un área de actividad geotermal en la superficie de la tierra. En aquellos casos donde no hay actividad superficial este término puede utilizarse para indicar el área de la superficie bajo la cual hay un reservorio geotérmico (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).

Ya que la energía geotérmica es habitualmente calificada como renovable y sustentable, es importante definir tales términos. Renovable corresponde a una propiedad de la fuente de energía, mientras que sustentable se refiere a la forma como el recurso es utilizado. El factor más crítico de la clasificación de energía geotérmica como una fuente de energía renovable es la tasa de recarga de la energía. (Stefansson, 2000)

La sustentabilidad del consumo de un recurso depende de su abundancia inicial, de la tasa de generación y de su tasa de consumo. Obviamente el consumo puede ser sustentable en cualquier período durante el cual un recurso se va creando con mayor rapidez de la que está siendo explotado.

CAPITULO 3

SISTEMAS RECIENTES DE CENTRALES GEOTERMoeLECTRICAS

3.1 DESCRIPCION DEL PROCESO DE UNA PLANTA GEOTERMICA.

Por medio de pozos específicamente perforados, las aguas subterráneas, que poseen una gran cantidad de energía térmica almacenada, se extraen a la superficie transformándose en vapor, que se utiliza para generar energía eléctrica

Este tipo de planta opera con los mismos principios que los de una termoeléctrica; como vapor, con excepción de la producción de vapor, que en este caso se extrae del subsuelo. El vapor de agua obtenido de la mezcla se envía a un separador; el secado de vapor va a la turbina de energía cinética que se transforma en energía mecánica y esta a su vez, en electricidad en el generador.

3.2 ESQUEMA DE UNA PLANTA GEOTERMICA

Básicamente, una central geotérmica consta de una perforación realizada en la corteza terrestre a gran profundidad. Para alcanzar una temperatura suficiente de utilización debe perforarse varios kilómetros; la temperatura aproximada a 5 kilómetros de profundidad es de unos 150° centígrados. El funcionamiento se realiza mediante un sistema muy simple: dos tubos que han sido introducidos en la perforación practicada, mantienen sus extremos en circuito cerrado en contacto directo con la fuente de calor. Por un extremo del tubo se inyecta agua fría desde la superficie, cuando llega a fondo se calienta y sube a chorro hacia la superficie a través del otro tubo, que tiene acoplado una turbina con un generador de

energía eléctrica. El agua fría enfriada es devuelta de nuevo por el primer tubo para repetir el ciclo.

En la figura 3.1 se ilustran los procesos que se llevan a cabo en una central geotermoeléctrica, para la generación de energía eléctrica.

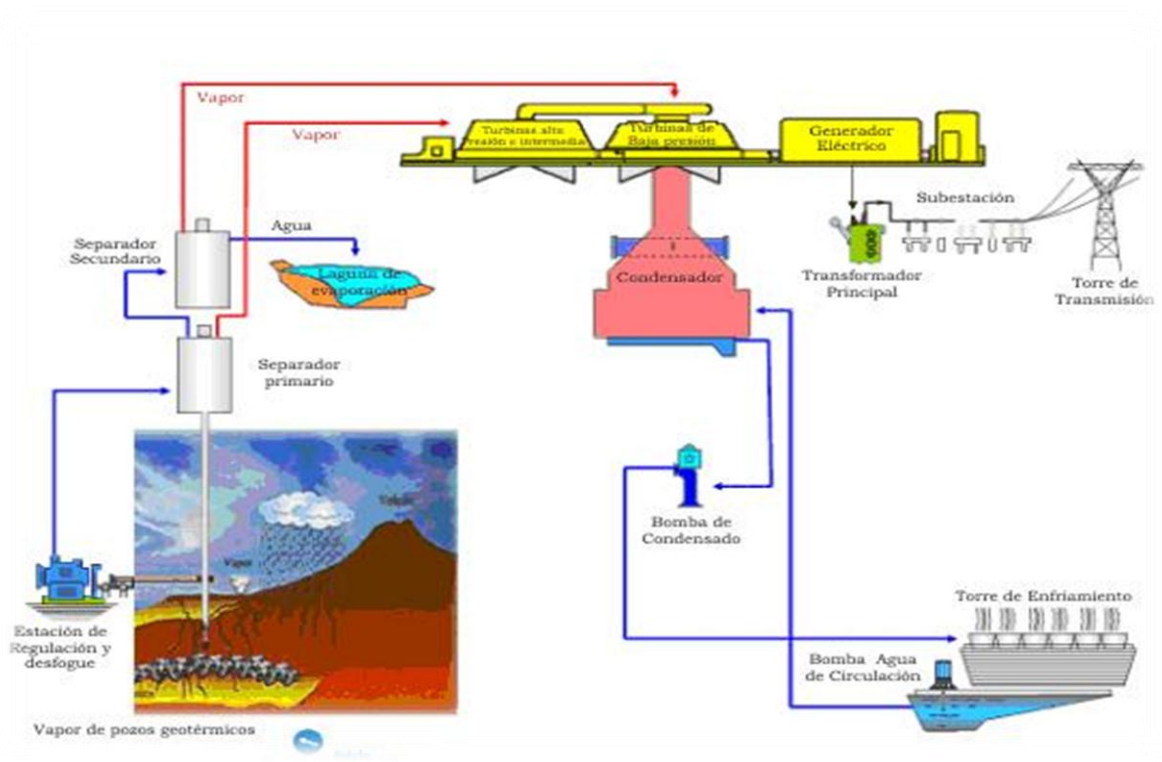


Figura 3. 1 Existen unidades de 5 MW en la que el vapor, una vez que trabajó en la turbina, se libera directamente a la atmósfera. En unidades de 20, 37,5 y 110MW, el vapor es enviado a un sistema de condensación; agua condensada, junto con la proveniente del separador, se reinyecta en el metro o descargadas a través de un tubo de evaporación.

El sistema descrito es viable en lo que respecta a su construcción y perforación, no en vano las prospecciones petrolíferas se realizan a varios kilómetros de profundidad, sin embargo se presenta un problema relacionado con las transferencias de calor. Cuando el ingeniero diseña dispositivos para conservar o transferir calor, utiliza aquellos que tienen capacidades aislantes o conductoras, según las aplicaciones.

3.3 FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTERMICA

Una central geotérmica funciona igual que una térmica, sólo varía la forma de calentar el agua. El vapor de agua a altas temperaturas (hasta 600° C) se canaliza desde el interior de la Tierra hasta la central permitiendo la evaporación del agua presente en las numerosas tuberías que se encuentran alrededor de la caldera. El vapor de agua adquiere mucha presión, por lo cual se utiliza para mover una turbina conectada al generador. Al girar la turbina se produce la electricidad, que viaja del generador hasta los transformadores, que elevan la tensión para transportar esta energía por la red eléctrica hasta los centros de consumo. Con la siguiente (figura 3.2) se puede resumir lo dicho.

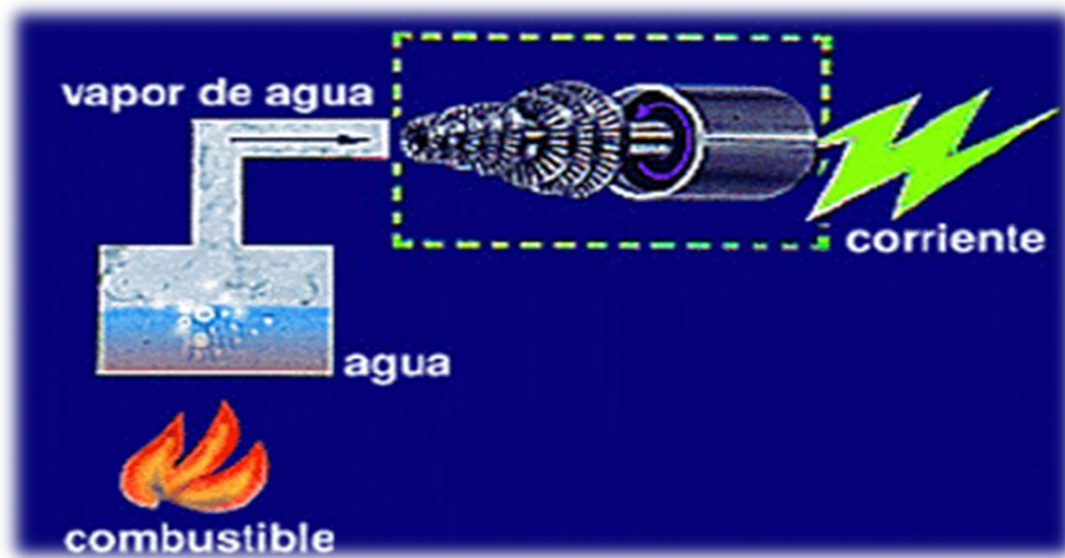


Figura 3.2 En lugar del combustible se encontraría el calor interno de la Tierra.

Por otro lado está funcionando el sistema de refrigeración que permite empezar de nuevo el ciclo, es decir, condensa el vapor de agua para que pueda volver a ser utilizado. El agua es condensada en una parte de la central que se mantiene a baja temperatura gracias a un sistema cerrado de tuberías que lo refrigeran, el condensador. Las tuberías contienen agua fría que reduce la temperatura del agua usada para mover la turbina, permitiendo su condensación. Cuando el agua del sistema de refrigeración se calienta, se dirige hacia las torres de refrigeración, donde se vuelve a enfriar en contacto con aire frío. Así se realiza continuamente el mismo ciclo.

3.4 PARTES DE UNA CENTRAL GEOTERMICA

Las partes son las mismas que en una central térmica, la única diferencia es el quemador y las chimeneas.

❖ Canalizaciones de agua

Hacen la función del quemador ya que sirve para calentar el agua que moverá la turbina, debido a las altas temperaturas que alcanza el vapor de agua (procedente del interior de la Tierra) que transportan.

❖ Turbinas

Las turbinas pueden considerarse como la parte más importante de la central ya que son las encargadas de mover el generador para producir la electricidad. Estas turbinas están diseñadas para soportar una temperatura de unos 600° C y una presión de unos 350 bares. Las turbinas están formadas por una serie de álabes de distintos tamaños que aprovechan la presión del vapor de agua para hacer girar la turbina.

❖ Generador

Es el encargado de producir la electricidad

❖ Condensador

Es el encargado de condensar el vapor que se encarga de mover la turbina para que pueda volver a ser utilizado

❖ Torres de refrigeración

Se encargan de mantener baja la temperatura del condensador, garantizando el correcto funcionamiento de la central. El agua que refrigera el condensador es enfriada en las torres de enfriamiento al entrar en contacto con el aire frío que circula a través de ellas.

Otras partes de la central se pueden observar en la figura 3.3, también importantes para garantizar un buen funcionamiento, serían todas las tuberías y bombas que transportan toda el agua a través de toda la central que se encargan de mantener baja la temperatura del condensador, garantizando el correcto funcionamiento de la central.

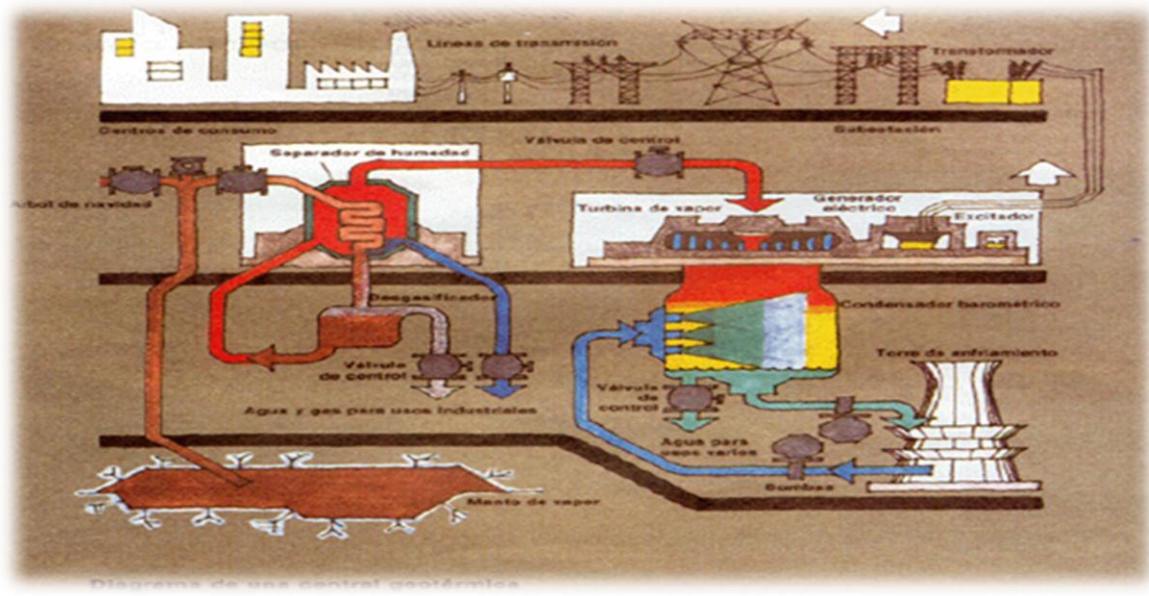


Figura 3.3 Funcionamiento y partes que forman una central geotérmica.

3.5 GENERACION DE ENERGIA GEOTERMICA

La transformación de la energía geotérmica en eléctrica es tal vez su mayor aplicación práctica (casi la tercera parte) y la que atrajo la atención en el nivel mundial hacia este recurso, ya que de las fuentes alternas de energía, es una de las que han demostrado ser económicamente factibles. La obtención de electricidad a partir de fluidos geotérmicos tiene una eficiencia relativamente baja en comparación con las plantas termoeléctricas convencionales, debido a la baja temperatura de los fluidos geotérmicos (que tienen un máximo de aproximadamente 380°C). Sin embargo, las plantas geotermoeléctricas son económicamente redituables debido al costo tan bajo del calor obtenido (en comparación con los combustibles fósiles), además de las ventajas que tiene en cuanto a un mínimo de contaminación ambiental. En el caso de la geotermia, se han estudiado los efectos que la explotación de un campo puede tener sobre la flora y la fauna local y aun cuando todavía quedan muchas investigaciones por hacer, se puede decir con base en la evidencia que se tiene en la actualidad, que es ésta una de las formas de energía que genera menos contaminación, sobre todo en comparación con los combustibles fósiles (que son de los mayores y más peligrosos agentes de degradación ambiental)

3.5.1 TIPOS DE PLANTAS DE GENERACION

El ciclo termodinámico que se sigue en las plantas geotérmicas es ciclo Rankine, con una serie de innovaciones dependiendo fundamentalmente de las características del campo geotérmico misma que ha dado lugar a diversos arreglos o tipos de plantas geotermoeléctricas.

Dependiendo de las características del recurso geotérmico, depende el tipo de planta de generación que se debe usar, la generación de electricidad se realiza principalmente mediante turbinas de vapor convencionales y plantas de ciclo binario, Las turbinas de vapor convencionales, requieren fluidos a temperaturas de a lo menos 150°C y están disponibles con descargas atmosféricas (back-pressure), o bien con descarga de condensación.

Existen tres tipos comerciales de plantas de energía geotérmica dependiendo de las temperaturas y de las presiones:

- I. Plantas de Vapor Seco (Planta de descarga atmosférica).
- II. Plantas de Condensación ("Flasheo")
- III. Plantas binarias.

I. Plantas de Vapor Seco ("Planta de descarga atmosférica")

Planta Seca de energía de vapor ("Planta de vapor seco") también conocidas como "Planta de descarga atmosférica" El vapor se produce directamente a partir de la reserva geotérmica para funcionar las turbinas que accionan el generador, y la separación no es necesaria ya que los pozos sólo producen vapor. La figura (3.4) de abajo es una versión más simplificada del proceso. Este tipo de turbinas con escape atmosférico son más simples y de menor costo, el vapor se utiliza directamente del pozo de vapor seco o, después de la separación, desde pozos de vapor húmedo, es pasado a través de la turbina y descargado a la atmósfera.

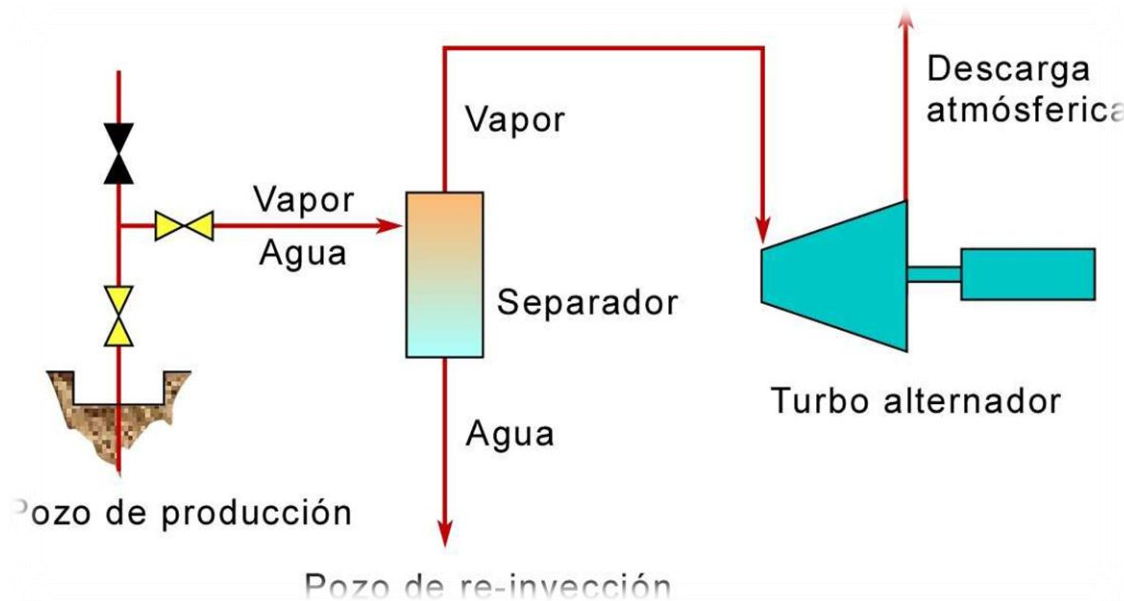


Figura 3.4 Esquema de una planta geotérmica de descarga atmosférica. El flujo del fluido geotermal está indicado en rojo.

Con este tipo de unidad, el consumo de vapor (de la misma presión de ingreso) por kilowatt-hora producido es casi el doble de las unidades de condensación. Sin embargo, las turbinas de descarga atmosférica son inmensamente útiles como plantas piloto, plantas portátiles en el caso de pequeños abastecimientos desde pozos aislados, y para generar electricidad con pozos exploratorios durante el desarrollo del campo. Son útiles también cuando el vapor tiene un alto contenido de gases no condensables (>12% en pesos)

Las unidades de descarga atmosférica pueden ser construidas e instaladas muy rápidas y puestas en operación en poco más de 13-14 meses desde la fecha que son ordenadas. Este tipo de máquinas está usualmente disponible en tamaños pequeños (2,5 – 5MWe).

En este sistema el vapor geotérmico no es mezclado con el agua. Los pozos de producción se perforan abajo de la capa conductora del agua freática, presurizado el vapor (180 ° - 350 ° C) es traído a la superficie a alta velocidad, y pasado mediante una turbina de vapor para generar electricidad. Usualmente, el vapor se pasa mediante un condensador para convertirla en agua. Esto mejora la eficiencia de la turbina y evita los problemas ambientales asociada con el alivio directo de vapor en la atmósfera. El agua no utilizada se reinyecta en el campo por medio de pozos de reinyección.

El calor que se pierde se ventila mediante torres de enfriamiento, las eficiencias de conversión de energía son más bajas, alrededor 30%. La eficiencia y la economía de las plantas secas de vapor son afectadas por la presencia de gases no condensables tal como hidrógeno, dióxido de carbón y ácido sulfúrico. La presión de estos gases reduce la eficiencia de las turbinas, y además, la remoción de los gases sobre terrenos ambientales se agrega al costo de operación.

II. Plantas de Condensación ("Flasheo")

Este tipo usa un depósito geotérmico constituido de agua a una temperatura entre 300 a 700°F. En este tipo de sistema, el fluido se rocía en un tanque a presión baja, ocasionando que el fluido rápidamente se evapore. El vapor se usa entonces para mover la turbina. Hay comúnmente algún líquido que permanece en el tanque después de que el fluido se rocía para evaporarse. Si el líquido es lo suficientemente caliente, puede rociarse nuevamente en un segundo tanque para extraer aun más energía.

Este es el caso más sencillo de producción eléctrica, en el que el agua de origen geotérmico es absorbida desde el pozo de alimentación, ya en forma de vapor, hacia una turbina a la que obliga a girar a gran velocidad, perdiendo en el trabajo su energía, que se traduce en una pérdida de presión y de temperatura, que la devuelven a su estado líquido. Aunque aparentemente puede parecer un proceso fácil, es prácticamente imposible conseguir que el vapor este absolutamente seco, por lo que se coloca a la salida del vapor del pozo un separador centrífugo que recoge gran parte del agua, su esquema se muestra en la siguiente figura 3.5 Calienta el agua a presión se separa en un buque de superficie (llamado un separador de vapor) en vapor y agua caliente (llamado "salmuera" en la imagen adjunta). El vapor se suministra a la turbina, y las potencias de turbina de un generador. El líquido se inyecta de nuevo en el depósito. La primera planta de este tipo se puso en operación en Wairakei, Nueva Zelanda con una capacidad de 1900Mw, plantas similares existen en Japón, Islandia, Salvador y México.

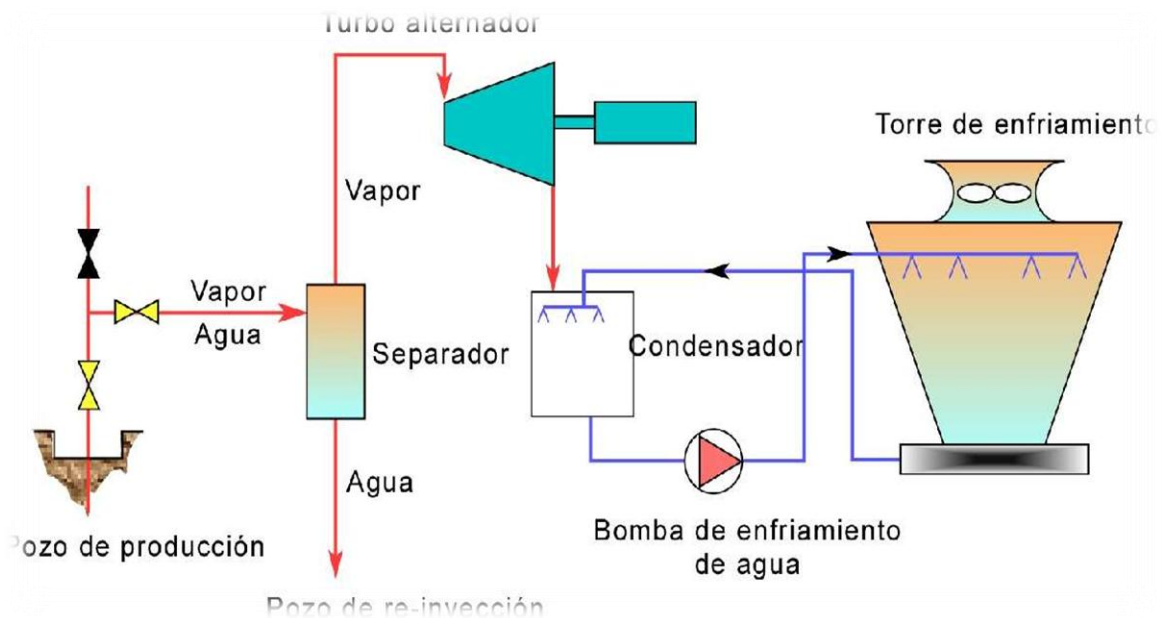


Figura 3.5 Esquema de Planta de Flasheo.

Este sistema se usa donde el recurso hidrotérmico está en una forma líquida. El fluido se rocía en un tanque de destello, que tiene una presión inferior que la del fluido, ocasionando (o destello) rápidamente la evaporación. La mayoría del fluido geotérmico no destella, y este fluido se reinyecta en el depósito. Alternativamente, si el fluido que permanece en el tanque tiene una temperatura suficientemente alta, puede pasarse en un segundo tanque, donde una reducción de presión induce un destellando adicional para evaporar. Este vapor, junto con la descarga desde la turbina principal, se usa para manejar una segunda turbina o la segunda etapa de la turbina principal para generar electricidad adicional. Típicamente, un 20 - 25% se logra aumentar en el rendimiento, con un 5% aumento en los costos de planta.

Típicamente, varían en el tamaño desde 5 MW a 100 MW. Depende de las características del vapor, el contenido de gas, y presión. Una pequeña planta (menos de 10 MW) requiere que el vapor se ubique adyacente; al depósito a fin de reducir los costos de tubería. Frecuentemente tales unidades no tienen un condensador, y se llaman backpressure unidades. Estos son muy baratos y simples para instalar, pero son ineficientes (típicamente 10-20 tonelada por la hora de vapor para cada MW de electricidad) y tienen impactos ambientales más altos.

III. Plantas binarias.

Los avances recientes en la tecnología geotérmica han hecho posible la producción económica de la electricidad a partir de recursos geotérmicos inferior a 150°C (302°F). Las plantas binarias utilizan típicamente un sistema de ciclo Rankin orgánico. El agua geotérmica (llamado "fluido geotérmico") se calienta un líquido, tal como isobutano u otros fluidos orgánicos tales como pentafluoropropano, que hierve a una temperatura más baja que el agua. Los dos líquidos se mantienen completamente separados mediante el uso de un intercambiador de calor, que transfiere la energía térmica del agua geotérmica para el fluido de trabajo.

El fluido secundario se expande en vapor gaseoso. La fuerza del vapor en expansión, como el vapor, hace girar las turbinas que impulsan los generadores. Posteriormente, el agua producida geotérmica se inyecta de nuevo en el depósito, como se muestra en la figura 3.6 El fluido es calentado y vaporizado; el vapor producido acciona una turbina normal de flujo axial, posteriormente es enfriado y condensado, y el ciclo comienza nuevamente (se observa en la figura 3.6) Seleccionando un fluido secundario apropiado, el sistema binario puede diseñarse para utilizar fluidos geotermiales con un rango de temperatura entre 85 y 170°C . El límite superior depende de la estabilidad térmica del fluido binario orgánico, y el límite inferior depende de factores técnicos-económicos.

Las plantas binarias se construyen normalmente en pequeñas unidades modulares, de pocos cientos de KW a pocos MW de capacidad. Estas unidades pueden así ser interconectadas para constituir plantas eléctricas de decenas de MW. Sus costos dependen de numerosos factores pero principalmente de la temperatura del fluido geotermal utilizado, que define el tamaño de la turbina, los intercambiadores de calor y el sistema de enfriamiento. El tamaño total de la planta es poco significativo con respecto al costo específico, ya que es posible interconectar una serie de unidades modulares standard para lograr mayores capacidades de generación. La tecnología de plantas binarias es un medio seguro y de costos apropiados para convertir en electricidad la energía disponible de campos geotérmicos del tipo agua dominante (bajo 170°C).

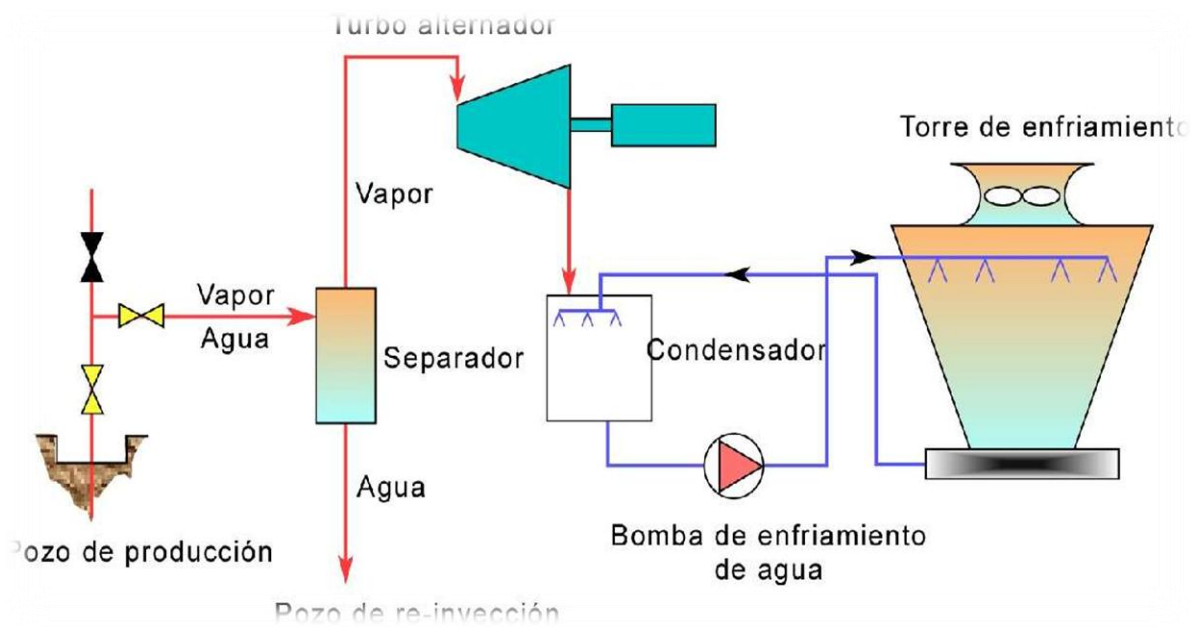


Figura 3.6 Esquema de una planta geotérmica de condensación. El flujo del fluido de alta temperatura está indicado en rojo y el agua fría en azul. El ciclo binario es entre 7 y 12 % eficiente, dependiendo de la temperatura del fluido primario (geotérmico). La planta Binaria de Ciclo típicamente varía en el tamaño desde 500 kW a 10 MW.

Un nuevo sistema binario, el ciclo Kalina, que utiliza una mezcla de agua y amoníaco como fluido secundario, se desarrolló en la década de los años 1990. El fluido secundario se expande, en condiciones de sobrecalentamiento, a través de turbinas de alta presión y posteriormente recalientado antes de accionar la turbina de baja presión. Después de la segunda expansión el vapor saturado es conducido hacia un ebullidor recuperativo, antes de ser condensado en un condensador enfriado por agua. El ciclo Kalina es más eficiente, pero es de un diseño más complejo.

Las pequeñas plantas portátiles, ya sean convencionales o no, no sólo reducen los riesgos relativos a la perforación de nuevos pozos, sino lo más importante, que pueden ayudar a proporcionar los requerimientos de energía de áreas aisladas. La conveniencia de pequeñas plantas portátiles es aún más evidente para aquellas áreas que no tienen acceso a combustibles convencionales y también para comunidades donde sería demasiado costosa la conexión al sistema eléctrico nacional o regional, a pesar de la existencia de líneas de transmisión de alto voltaje en las cercanías.

3.6 APLICACIONES DE ENERGIA GEOTERMICA

Las aplicaciones que se pueden dar en un fluido dependen de su contenido en calor, es decir, en su entalpía (cantidad de energía térmica que un fluido puede intercambiar con su entorno).

Como no existen aparatos que determinen directamente la entalpía de un fluido en el subsuelo y la temperatura puede considerarse más o menos proporcional a esta, se ha decidido como consecuencia de esto emplear las temperaturas de los fluidos en lugar de sus contenidos en calor, pues, al fin y al cabo, son las temperaturas las que determinan su futura aplicación industrial.

Posteriormente se muestran las aplicaciones más importantes de la energía geotérmica con los rangos de temperatura:

- i. Alta temperatura: más de 150 °C
- ii. Media temperatura: entre 90 y 150°C.
- iii. Baja temperatura: entre 30 y 90°C.
- iv. Muy baja temperatura: menos de 30°C

De acuerdo a las temperaturas se realizan las aplicaciones:

- i. Alta temperatura: más de 150 °C

Permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.

- ii. Media temperatura: entre 90 y 150°C.

Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.

- iii. Baja temperatura: entre 30 y 90°C.

Su contenido en calos es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para la calefacción de edificio y en determinados procesos industriales y agrícolas.

iv. Muy baja temperatura: menos de 30°C

Puede ser utilizada para la calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor.



Figura 3.7 Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a su temperatura.

CAPITULO 4

CASOS DE ESTUDIO Y ANALISIS

4.1 INTRODUCCION

Con el afán de tener mejores alternativas para un mejor aprovechamiento de los recursos geotérmicos, se han desarrollado nuevos sistemas algunos de los cuales se han actualizado para obtener mayor eficiencia.

La características de estos sistemas son la calidad de vapor, si la calidad es alta se menciona que es recurso de vapor dominante, si la calidad de vapor es baja o nula el recurso es simplemente liquido dominante. Para aprovechar los yacimientos de líquido dominante se han desarrollado entre otros, los sistemas de flujo total. Un sistema de flujo total es aquel que aprovecha en forma integral la mezcla proveniente del pozo hasta la presión de descarga o aquella fijada por la temperatura del sumidero. La ventaja de estos sistemas se debe a la eliminación de las Pérdidas asociadas con el "flasheo" o proceso de separación.

En México, el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, es el segundo más importante en capacidad de generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de este recurso natural proveniente del subsuelo. (Como se muestra en la figura 4.1)

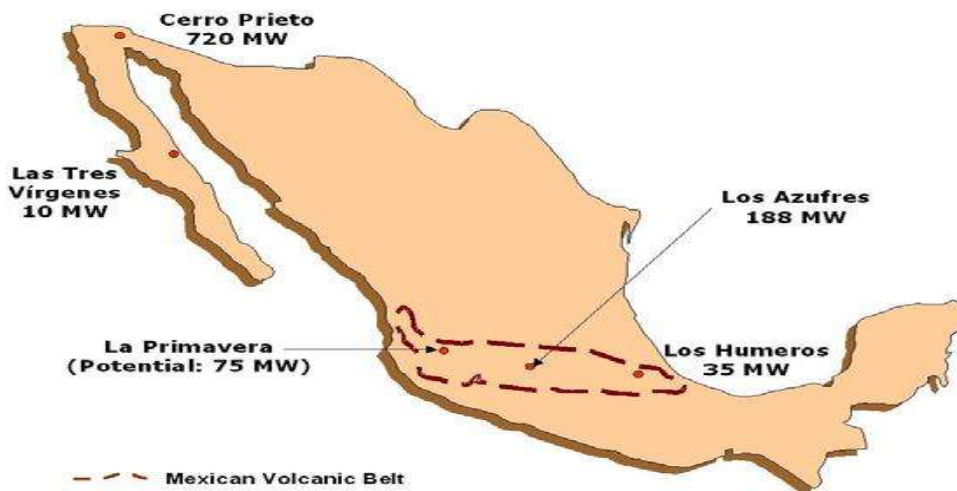


Figura 4.1 Ubicación de los principales generadores Geotérmicos en México.

4.2 LOCALIZACION, MEDIO FISICO Y ESTADO ACTUAL DE LOS AZUFRES

El campo geotérmico los Azufres, con una extensión de 81 km², se localiza en la sierra de San Andrés, dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Mexicano a 80 km al oriente de la ciudad de Morelia.



Figura 4.2 Localización de Los Azufres.

Se ubica a una elevación de 2800 msnm, en una zona de protección forestal compuesta por un bosque de coníferas, manantiales termales y pequeñas lagunas que lo hacen un sitio de gran atractivo turístico. Tiene un clima templado, sub-húmedo con temperaturas promedio anual mínima y máxima de 12 y 18°C, respectivamente, y una precipitación promedio anual de 1200 mm. Los suelos constitutivos del lugar son ácidos de origen coluvio-aluvial derivados de cenizas volcánicas. La fauna existente es característica de los bosques de

coníferas del sistema volcánico transversal, destacando por su diversidad los grupos de aves y reptiles. Ninguna de las especies de fauna y flora reportadas para el lugar se encuentran bajo algún régimen de protección especial (CFE, 2012).

El aprovechamiento del recurso geotérmico para generar energía eléctrica, se inició en agosto de 1982 con la entrada en operación comercial de cinco unidades a contrapresión de 5 MW cada una. Actualmente, la capacidad instalada es de 188 MW, integrados por una unidad a condensación de 50 MW, 4 unidades también a condensación de 25 MW cada una, 7 unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW cada una (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2003).

A la fecha se han perforado más de 80 pozos a profundidades que oscilan entre 600 y 3500 m. Alrededor de 30 de esos pozos se encuentran en producción continua, y tres de ellos en inyección para deshacerse con seguridad del agua separada.

Con esa infraestructura de pozos, se tiene una disponibilidad de vapor en superficie de más de 1600 toneladas por hora (t/h), el cual viene acompañado de 1300 t/h de agua separada (salmuera), una fracción (280 t/h) de la cual alimenta a las unidades de ciclo binario. Para el manejo del agua separada se dispone de una capacidad de inyección de 1500 t/h a través de los pozos inyectoros (Residencia de Producción Los Azufres, 2012).

La siguiente figura 4.3 Indica la localización del campo geotérmico de Los Azufres, geología de la zona y ubicación de los pozos.

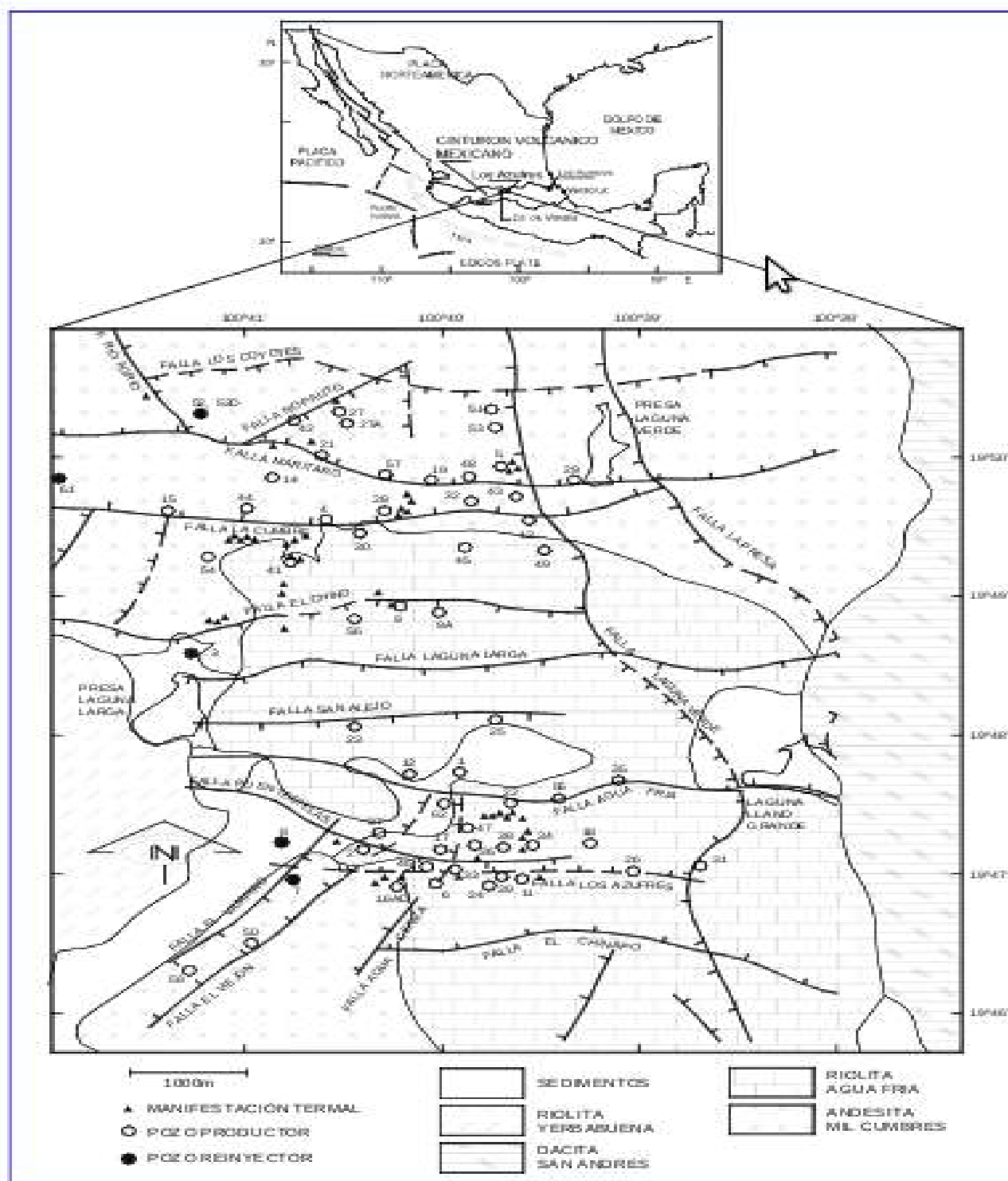


Figura 4.3 Ubicación de pozos Geotérmicos Azufres

4.3 PRIMER CASO DE ESTUDIO Y ANALISIS

En este primer caso de estudio se analizara la potencia de generación utilizando el pozo AZ_U-12 el cual tiene las siguientes características:

El pozo AZ_U-12 de los azufres tiene una producción de vapor de 2000 Ton/Hr, lo cual su calidad de vapor obtenido al salir del pozo es de 70% con una presión de 35 Bar, teniendo dos etapas de flasheo como se ilustra en la figura 4.4, en su segunda etapa de flasheo tiene una presión de 15 Bar y la presión del vapor al salir de la turbina es de 1.5 Bar, la eficiencia del turbogenerador es del 85%.

Posteriormente se ilustra en la figura 4.5 un diagrama de Presión vs Entalpia con valores específicos del pozo AZ_U-12.

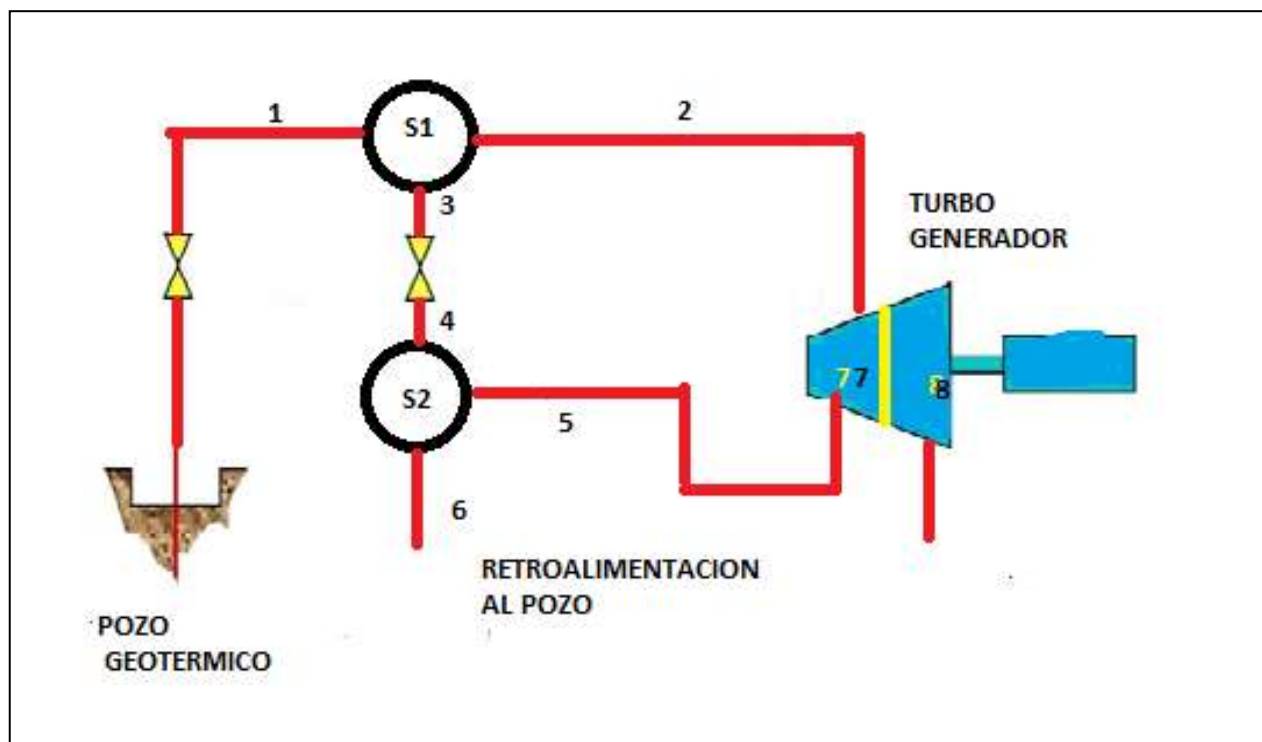


Figura 4.4 Diagrama caso de análisis de una planta con dos etapas de flasheo.

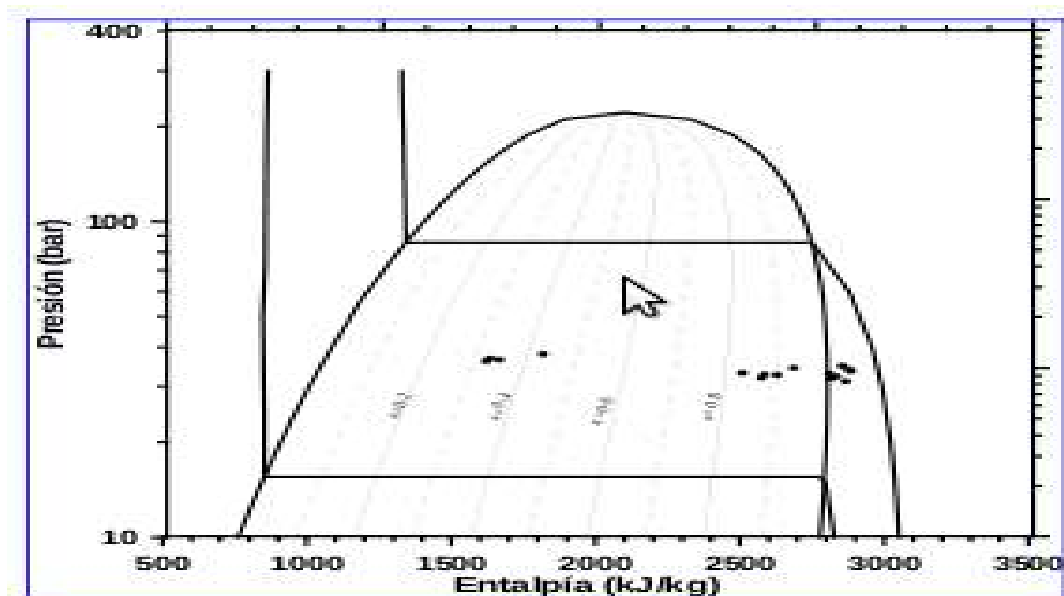


Figura 4.5 Ilustración de Entalpia vs Presión del pozo AZ_U-12 con valores específicos del pozo.

Variables:

- $m^{\circ}1$ = Valor de producción de Vapor (Ton/Hr)
- $X1$ = Calidad del Vapor al salir del Pozo (%)
- ntg = Eficiencia del Turbogenerador (%)
- $P1$ = Presión del Vapor al salir del Pozo (Bar)
- $P4$ = Presión en la segunda etapa de Flasheo (Bar)
- $P9$ = Presión de Vapor al salir de la Turbina (Bar)

La figura 4.6 muestra el diagrama de la ubicación de las variables para el primer caso de estudio.

Datos obtenidos de las características del Pozo AZ_U-12:

- $m^{\circ}1 = 2000 \frac{\text{Ton}}{\text{Hr}}$
- $X1 = 70\% = 0.7$
- $ntg = 85\% = 0.85$

- $P_1 = 35 \text{ Bar}$
- $P_4 = 15 \text{ Bar}$
- $P_9 = 1.5 \text{ Bar}$

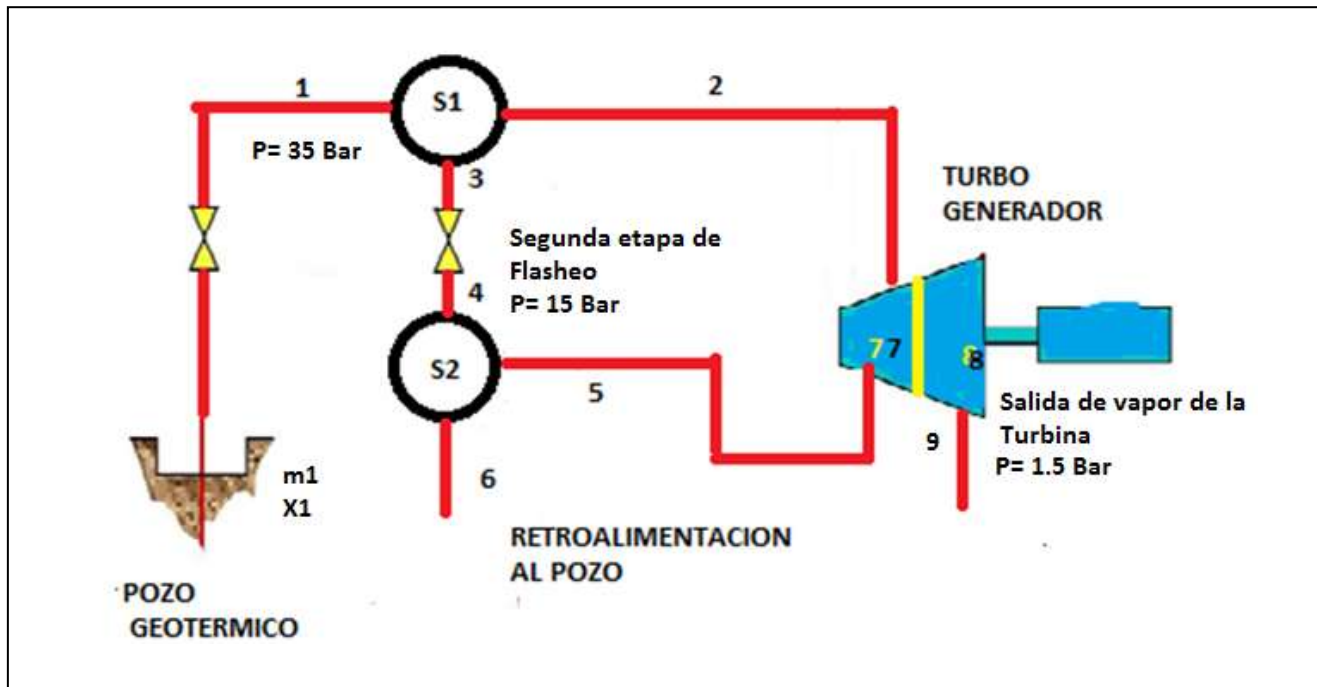


Figura 4.6 ilustración de características del pozo AZ_U-12

Solución del Problema:

Para encontrar el valor de vapor de $m^{\circ}2$ es:

$$m^{\circ}2 = m^{\circ}1 * X1$$

$$m^{\circ}2 = 2000 \text{ Ton/Hr} (0.7) = 1400 \text{ Ton/Hr}$$

Convirtiendo Ton/Hr a Kg/Seg

$$\frac{1400}{1} * \frac{1000}{60} * 60 = 388.88889 \text{ Kg/Seg}$$

De acuerdo a la tabla de presión, se obtienen los siguientes datos:

- $P_1 = 35 \text{ Bar}$

- $hf1 = 1049.8$
- $hfg1 = 1753.7$
- $hg1 = 2803.4$
- $sf1 = 2.7253$
- $sg1 = 6.1253$
- $sf g1 = 3.4$

- $P4 = 15 \text{ Bar}$
- $hf4 = 844.84$
- $hfg4 = 1947.3$
- $hg4 = 2792.2$
- $sf4 = 2.3150$
- $sg4 = 6.4448$
- $sf g4 = 4.1298$

De acuerdo al diagrama de la figura 4.6 tenemos que para obtener el vapor seco en $m^{\circ}3$ es:

$$m^{\circ}2 = m^{\circ}1$$

$$m^{\circ}4 = m^{\circ}3$$

Entonces $m^{\circ}3 = m^{\circ}1 - m^{\circ}2$

$$m^{\circ}3 = 2000\text{Ton}/\text{Hr} - 1400\text{Ton}/\text{Hr} = 600\text{Ton}/\text{Hr}$$

Convirtiendo Ton/Hr a Kg/Seg

$$600\text{Ton}/\text{Hr} = 166.66667\text{Kg}/\text{Seg}$$

Por lo tanto la entalpia en $h2$ es:

$$h2 = hg1 = 2803.4 \text{ y } h3 = hf1 = 1753.7$$

Entonces la entalpia en $h3$ es:

$$h3 = h4 = hf4 + X4 * hfg4$$

Por lo que de acuerdo a la ecuación anterior se puede obtener la calidad del vapor, tenemos que despejando $X4$ se tiene:

$$X4 = \frac{h3 - hf4}{hfg4}$$

$$\frac{1753.7 - 844.84}{1947.3} = 0.46672$$

Por lo tanto para obtener el vapor seco en $m^{\circ}5$ es:

$$m^{\circ}5 = m^{\circ}4 * X4$$

$$600Ton/Hr * 0.46672 = 280.032Ton/Hr$$

Convirtiendo Ton/Hr a Kg/Seg

$$280.032Ton/Hr = 77.78667Kg/Seg$$

La entalpia en $h5$ es entonces:

$$h5 = hg4 = 2792.2$$

Por lo tanto, de acuerdo a la presión será igual a $P5$ a la salida de la segunda etapa de flasheo como se ilustra en la figura 4.6 y posteriormente es igual a $P7$ a la entrada en el Turbogenerador, entonces tenemos que:

$$P4 = P5 = P7 \text{ (para el punto 7)}$$

Por lo que la ecuación de la entropía en $S2$ es:

$$S2 = S7 = Sf4 + X7 * Sfg4$$

De acuerdo a la ecuación de la entropía, se busca encontrar la calidad del vapor (*para el punto 7*) entonces tenemos que:

$$X7 = \frac{S2 - Sf4}{Sfg4} = \frac{6.1253 - 2.3150}{4.1298} = 0.92263$$

Entonces tenemos que la entalpia:

$$h7 = hf4 + X4 * hfg4$$

$$844.84 + 0.92263 * (1947.3) = 2641.47739$$

Por lo que para el punto 8 del diagrama de estudio (figura 4.6) tenemos que el vapor seco en $m^{\circ}7$ es el mismo en $m^{\circ}2$

$$m^{\circ}7 = m^{\circ}2$$

De acuerdo a lo anterior la entalpia en $h8$ es:

$$h8 = \frac{m^{\circ}5 * h5 + m^{\circ}7 * h7}{m^{\circ}5 + m^{\circ}7} = \frac{280.032 * (2792.2) + 1400 * (2641.47739)}{280.032 + 1400} = 2666.600$$

Su calidad del vapor es:

$$X8 = \frac{h8 - hf4}{hfg4} = \frac{2666.60021 - 844.84}{1947.3} = 0.9355$$

La entropía se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S8 = Sf4 + X8 * Sfg4$$

$$S8 = 2.3150 + 0.9355(4.1298) = 6.17016$$

Tomando en cuenta que la entropía $S9$ es:

Entonces si $S8 = S9$

$$S9 = Sf9 + X9 * Sfg9$$

Podemos calcular su calidad del vapor en $X9$ despejando de la ecuación anterior para obtener:

$$X9 = \frac{S9 - Sf9}{Sfg9} = \frac{6.17016 - 1.4336}{5.7897} = 0.81810$$

Tomando en cuenta que la presión de salida es $P9 = 1.5Bar$ y de acuerdo a la tabla de presión y de acuerdo a la tabla de presión se tienes los siguientes datos:

- $P9 = 1.5 \text{ Bar}$
- $hf9 = 467.11$
- $hfg9 = 2226.5$
- $hg9 = 2693.6$
- $sf9 = 1.4336$
- $sg9 = 7.2233$
- $sfg9 = 5.7897$

Entonces para encontrar la entalpia en $h9$ se llega a la siguiente ecuación:

$$h9 = hf9 + X9 * hfg9$$

$$h9 = 467.11 + 0.81810 * (2226.5) = 2288.60965$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, entonces la potencia Generada es:

- $m^{\circ}2 = 1400 \text{ Ton/Hr} = 388.88889 \text{ Kg/Seg}$
- $h2 = 2805.4$
- $h7 = 2641.47739$
- $m^{\circ}8 = 1400 \text{ Ton/Hr} = 388.88889 \text{ Kg/Seg} \eta$
- $h8 = 2666.6021$
- $h4 = h9 = 2288.60965$
- $ntg = 0.85$
- $m^{\circ}5 = 280.032 \text{ Ton/Hr} = 77.78667 \text{ Kg/Seg}$

De acuerdo a la fórmula de la potencia:

$$POTENCIA = POT = [m^{\circ}2 * (h2 - h7) + m^{\circ}8 * (h8 - h9)] * ntg$$

Sustituyendo valores en la fórmula de la potencia tenemos que:

$$POT = 179.1330 \text{ Kw}$$

4.4 SEGUNDO CASO DE ESTUDIO Y ANALISIS

Recordando el primer caso de estudio, se analizo la Potencia de Generación del pozo AZ_U-12; ahora posteriormente para este segundo caso, se analizara la potencia de Generación para el pozo AZ_U-18 para una planta binaria básica con condensador el cual tiene las siguientes características:

El pozo AZ_U-18 de los azufres tiene 1000 Ton/Hr, su eficiencia es del 40%, los eyectores tiene un 30 Ton/Hr, presión en el escape de turbina es de 0.1 Bar, la eficiencia del turbogenerador es de 80%, su Presión de entrada es de 10 Bar; como se ilustra en la figura 4.7

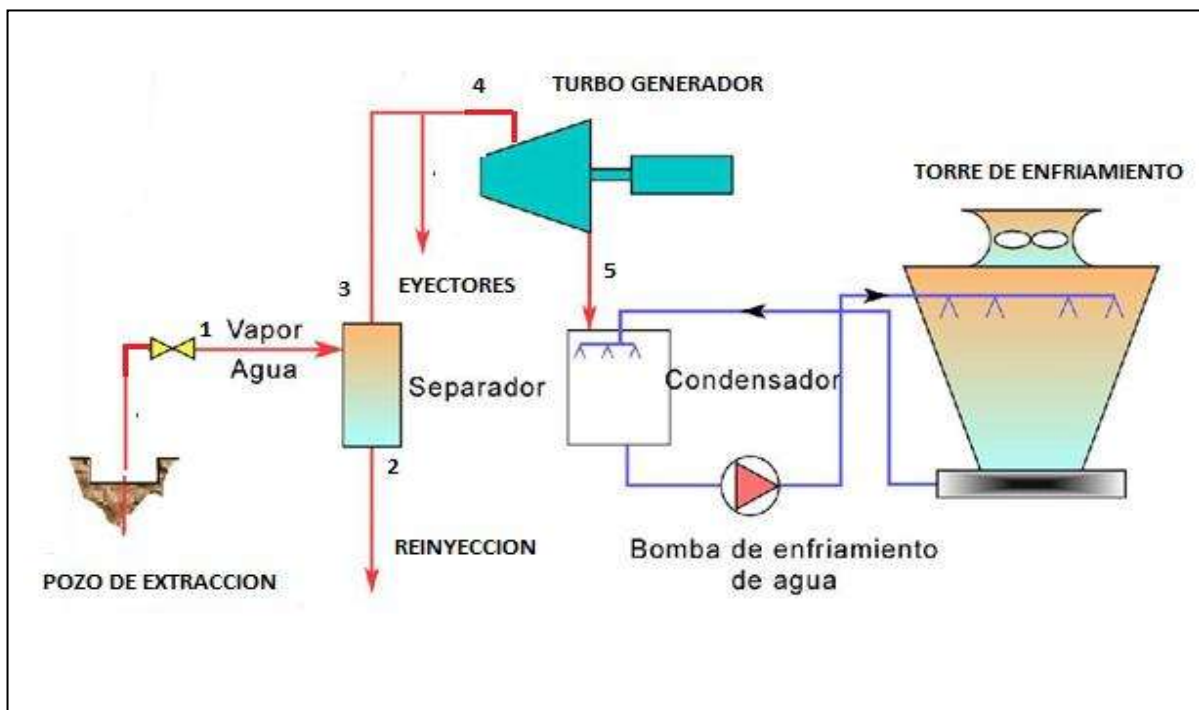


Figura 4.7 Diagrama del pozo Az_U-18 segundo caso de análisis de una planta binaria básica con condensador.

Variables:

- $m^{\circ}1$ = Valor de producción de Vapor (Ton/Hr)
- $X1$ = Calidad del Vapor al salir del Pozo (%)

- ntg = Eficiencia del Turbogenerador (%)
- $P1$ = Presión del Vapor al salir del Pozo (Bar)
- $Eyectores$ ($\frac{Ton}{Hr}$)

Datos obtenidos:

- $m^{\circ}1 = 1000 \frac{Ton}{Hr}$
- $X1 = 40\% = 0.4$
- $ntg = 80\% = 0.80$
- $P1 = 10 Bar$
- $Eyectores = 30 \frac{Ton}{Hr}$
- *Presion en el escape de la turbina 0.1 Bar*

Solución del Problema:

De acuerdo a la tabla de presión, se obtienen los siguientes datos:

- $P1 = 10 Bar$
- $hf1 = 762.81$
- $hfg1 = 2015.3$
- $hg1 = 2778.1$
- $sf1 = 2.1387$
- $sg1 = 6.5863$
- $sf g1 = 4.4476$

De acuerdo al diagrama de la figura 4.7 tenemos que el vapor seco en $m^{\circ}3$ es:

$$m^{\circ}3 = X1 * m^{\circ}1$$

$$m^{\circ}3 = 0.4 * (1000) = 400 Ton/Hr$$


 Flujo de vapor que sale de separador (figura 4.7)

De acuerdo a la figura 4.7 la presión $P1$ al entrar al separador, se tiene que entonces:

$$P1 = P2 = P3$$

Por lo que el vapor que llega a la Turbina, Suponiendo que se obtiene seco, de acuerdo a la figura 4.6 se encuentra que:

$$m^{\circ}4 = m3 - Eyectores$$

$$m^{\circ}4 = 400 \frac{Ton}{Hr} - 30 \frac{Ton}{Hr} = 370 \frac{Ton}{Hr}$$

$$m^{\circ}2 = 1000 \frac{Ton}{Hr} + 30 \frac{Ton}{Hr} - 370 \frac{Ton}{Hr} = 800 \frac{Ton}{Hr}$$

De acuerdo a la fórmula de potencia se tiene que:

$$Pot = m^{\circ}4 * ntg * (h4 - h5)$$

Si la presión de escape de la turbina es de 0.1 Bar, entonces se tiene de tablas lo siguiente:

- $P = 0.1 \text{ Bar}$
- $hf5 = 191.83$
- $hfg5 = 2392.8$
- $sf5 = 0.6493$
- $sg5 = 8.1502$
- $sf g1 = 7.5009$

Entonces podemos deducir que:

$$S1 = S4 = 6.5863$$

Por ende se deduce que:

$$S4 = S5$$

Esto es:

$$S4 = S5 = Sf5 + X5 * Sfg5$$

Despejando se obtiene:

$$X5 = \frac{S4 - Sf5}{Sfg5} = \frac{6.5863 - 0.6493}{7.5009} = 0.7915$$

Entonces tenemos que:

$$h5 = hf5 + X5 * hfg5$$

$$h5 = 191.83 + 2342.8 * (0.7915) = 2085.7312$$

Por lo que ahora Sustituyendo valores en la fórmula de la Potencia, tenemos que:

$$Potencia = m^{\circ}4 * ntg * (h4 - h5)$$

$$Pot = 370e^3 / 3.6e^3 \frac{Ton}{Hr} * (0.8) * (2778.1 - 2085.7312)$$

$$\underline{Potencia = 55.3895Kw}$$

Si tenemos $X1 = 0.4$ que el consumo de vapor es:

$$C = \frac{370e^3}{55.3895e^3} = 6.6799 \frac{Kg}{KwHr}$$

Es decir que por cada KWH generado la turbina recibe $6.6799 \frac{Kg}{KwHr}$ de vapor.

De acuerdo a la siguiente Tabla 4.1 Se observa la potencia de generación en KW entre las plantas de "Flasheo y Binaria".

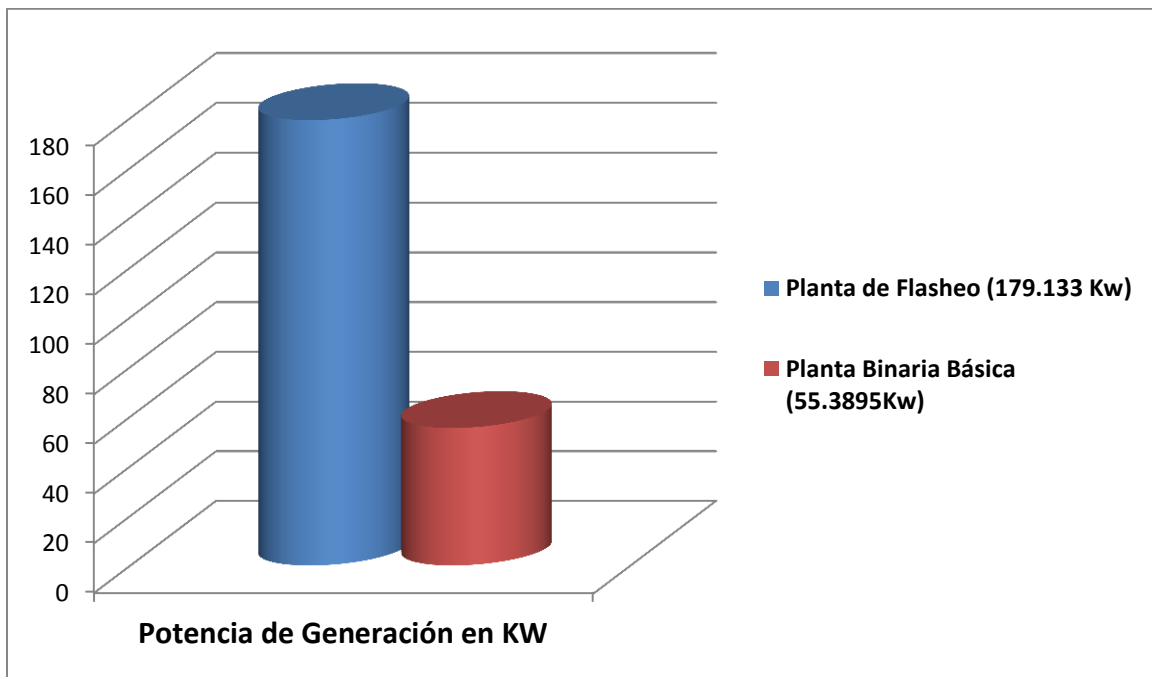


Tabla 4.1 Diagrama comparativo en potencia de generación entre las dos plantas de caso de estudio y análisis.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Los sistemas geotérmicos son considerados como los más prácticos, tanto por el rendimiento como por el mantenimiento. La única pieza móvil de este tipo de centrales se reduce a la turbina, lo que mejora la vida útil de todo el conjunto. Otra característica de este tipo de centrales es que se refiere a la fuente de energía utilizada, esta se encuentra siempre presente y suele ser constante en el tiempo, con apenas variaciones.

La producción de energía eléctrica a partir de energía geotérmica es ya una realidad en la actualidad bien definida y establecida en nuestro país (México), y sobre todo en nuestra región (Michoacán).

La energía termal presente en el subsuelo es enorme, si se explota correctamente, la energía geotérmica podría verdaderamente asumir un rol importante en el balance de la energía y no solo en México sino también en algunos países. En ciertas circunstancias, incluso recursos geotérmicos de pequeña escala, son aptos para solucionar numerosos problemas locales y mejorar la calidad de vida de pequeñas comunidades aisladas. Respecto de otras fuentes de energías renovables.

Además de que posee el potencial de proveer volúmenes más grandes de energía a menor costo que las alternativas eólicas y solares en las aéreas con la geología necesaria y a cualquier hora del día o de noche, la clave reside en dar con rocas de granito caliente ubicadas a no más de 5 Km debajo de la superficie de la tierra.

Actualmente no existe forma alguna de producir o de transformar la energía a una forma que sea utilizable por el hombre sin ocasionar algún impacto directo o indirecto sobre el ambiente. Incluso la forma más antigua y simple de producir energía térmica esto es, quemando madera tiene un efecto nocivo y la deforestación, unos de los mayores problemas de los años recientes, empezó cuando nuestros ancestros cortaron árboles para coser su alimento y calefaccionar sus casas.

La explotación de la energía geotérmica también tiene un impacto sobre el ambiente, pero sin duda es una de las formas de energía menos contaminante.

Por otra parte la mayoría de las plantas Geotérmicas son de energía de base, es decir que operan las 24 hrs. del día los 365 días del año, estimando un factor de carga del 80%, a un costo promedio de 5 centavos de dólar por KWH, la industria geotérmica produce alrededor de 3000 millones de dólares anualmente en todo el mundo.

Finalmente la energía geotérmica es una energía renovable que aprovecha el calor interno de la tierra para poder tener energía eléctrica para cualquier uso, es una de las fuentes de energías renovables y limpia menos conocida pero es muy efectiva. En el interior de la tierra existe un gradiente térmico y por lo tanto un flujo de calor desde el interior hacia el exterior, ese flujo es aprovechado para hacer girar un rotor y entonces poder generar energía y convertirla en electricidad. Suecia fue el primero país que se utilizó la energía geotérmica fue en 1979 como consecuencia de la crisis petrolera, actualmente los países que más la utilizan son Finlandia, Estados Unidos, Japón, Alemania, Holanda y Francia.

5.2 RECOMENDACIONES

A la vista de los resultados obtenidos y de acuerdo a la tabla 4.1 a simple vista se observa que la planta de flasheo es de mucho mayor Potencia de Generación que la planta Binaria, pero hay que tomar en cuenta varios factores que influyen como: su producción de vapor en la planta binaria, el cual está por debajo que la de Flasheo al igual que su calidad de producción de vapor es menor la binaria que la de flasheo, pero si el caso fuera que la calidad de vapor fuera de un 80% y su producción de vapor fuera mayor, caemos en la recomendación de que la planta Binaria tiene mucho mayor productividad, eficiencia y rentabilidad, tomando en cuenta que la planta binaria utiliza una temperatura mediana a comparación de la de flasheo que está en temperaturas por arriba de los 150 °C y tienen impactos ambientales más altos, se concluye que el potencial geotérmico en los pozos de estudio y análisis en generación eléctrica a partir de recursos de media temperatura es bastante elevado, siendo óptima la aplicación de ciclos binarios. Esto abre la posibilidad por tanto, de invertir en este tipo de tecnología en un futuro próximo, recomendando especialmente ubicar las centrales en los yacimientos de temperatura media, por lo que se obtendrá una rentabilidad mayor.

Cabe resaltar, que ante la eliminación de las tarifas de régimen especial habría que irse a tamaños de planta de en torno a 30-40MW para que el proyecto sea económicamente rentable. Sin embargo, se prevé que esta situación se revierta debido al gran incremento del precio de venta eléctrica en los últimos años, lo que llevaría a niveles similares a la tarifas del régimen especial.

Pero para estos casos en específico, tomando en cuenta las características de los pozos de estudio, cabe resaltar que la de Flasheo tiene mucha mayor productividad que la planta binaria. Una recomendación importante es que para obtener mucho mayor eficiencia del pozo AZ_U-18 podría ser disminuir la temperatura de salida del vapor, re-inyectando agua fría directamente al pozo, para controlar su temperatura de vapor y colocando el diseño de una planta Binaria para así obtener mucha mayor potencia y eficiencia; o simplemente realizar un pozo artificial y así poder tener control de las características deseadas del mismo

y colocar una planta según sea el costo beneficio requerido. Un sistema recurso-planta (instalación de energía geotérmica) está constituido por los pozos geotermales, los ductos que transportan los fluidos geotermales la planta de utilización y frecuentemente el sistema de pozos de reinyección.

La interacción de todos estos elementos influye fuertemente en los costos de inversión y por lo tanto deben estar sujetos a un cuidadoso análisis. Para dar un ejemplo, en la generación de electricidad una planta de descarga a la atmósfera es la solución más simple y consecuentemente más barata que una planta de condensación de la misma capacidad. Estas sin embargo, requiere para operar más del doble del vapor que una planta de condensación y consecuentemente, al menos el doble de los pozos para abastecerla. Como los pozos son muy costosos, la planta eléctrica de condensación es efectivamente una opción más barata que una planta de descarga atmosférica. En efecto, esta última es elegida usualmente por razones diferentes a la económica.

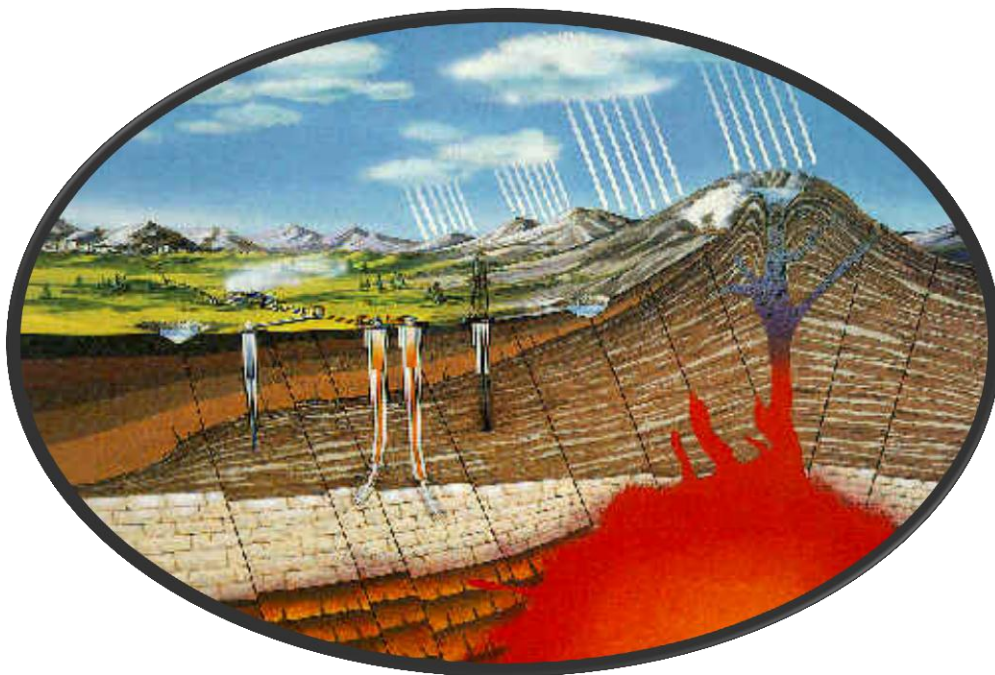


Figura 5.1 Modelo de sistema Geotérmico.

Los fluidos geotermales pueden transportarse en tuberías termalmente aisladas a distancias razonablemente grandes. En condiciones ideales pueden ser de hasta de 60 km de largo. Sin embargo, las tuberías, los equipos auxiliares necesarios (bombas, válvulas, etc.) y su mantenimiento, son todos bastante costosos y podrían pesar fuertemente en el costo de capital y en los costos de operación de la planta geotermal. Por lo tanto, la distancia entre el recurso y el lugar de utilización debe mantenerse lo más corta posible.

El costo de capital de una planta geotérmica es habitualmente mayor y a veces mucho mayor, que una planta similar alimentada por combustibles convencionales. Contrariamente, la energía que acciona una planta geotérmica cuesta mucho menos que el combustible convencional, y su costo corresponde al costo de mantención de los elementos geotermales de la planta (vapor-ductos, válvulas, bombas, intercambiadores de calor, etc.). El mayor costo de capital debería recuperarse por el ahorro en costos de energía. Por lo tanto el sistema recurso-planta debería programarse para una duración suficiente como para amortizar el costo inicial y en lo posible para una duración mayor.

BIBLIOGRAFIA

Los siguientes libros proporcionan información sobre varios temas de la energía Geotérmica, algunos anteriores a la década de 1990 se citan por su importancia Histórica.

1. H. Christopher H. Armstead, "Energía Geotérmica", versión en español RAFAEL GARCIA DIAZ ingeniero en minas de la universidad de Guanajuato, México, Noriega editores. 1989, Editorial Limosa S.A de C.V Balderas 95, Primer piso, 06040 México, D.F., Impreso en México primera edición 1989.
2. JOSE LUIS SANCHEZ BRIBIESCA, "Introducción a la Geotermia" Derechos reservados por: Comisión Federal de Electricidad. Rodano No.14 México 5, D.F. Esta edición y sus características son propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, México, Impresión en México 1982, Copyright 1982.
3. HECTOR ALONSO E. "Geothermal, an alternative energy source for power Generation" –Geothermal Resources Council. Bulletin, Febrero de 1985.
4. PAUL KRUGGER y VASEL ROBERTS. "Modular power plants for indigenous energy resources" –International Congress on Renewable Energy Resources. Madrid, España. Mayo de 1986.
5. ARMSTEAD, H.C.H., 1983. Geothermal Energy. E. & F. N. Spon, London, 404 pp.
6. AXELSSON, G. and GUNNLAUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: Long-term monitoring of high- and low enthalpy fields under exploitation, WGC 2000 Short Courses, Japan,.
7. FRANCIS, P., *Volcanoes*. Penguin Books Ltd. Harmondsworth, 1976
8. PANCZER, W.D., *Minerals of Mexico*. Van Nostrand Reinhold Co. Nueva York, 1987
9. PRESS, F. y SIEVER, R., *The Earth*. W.H. Freeman and Co. San Francisco, 1974
RIENEHART, J.S., *Geysers and Geothermal Energy*. SpringerVerlag. Nueva York, 1980.
GUDMUNDSSON, J.S., 1988. The elements of direct uses. Geothermics

10. HOCHSTEIN, M.P., 1990. Classification and assessment of geothermal resources. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization, UNITAR, New York
11. INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2001. Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9), New York, April. LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., Geothermal Energy, UNESCO, Paris.
12. , E.A., 1968. Thermal history of the Earth. In: The Earth's Crust and Upper Mantle, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon.
13. LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. and Muffler, L.J.P., eds., Geothermal Systems, Principles and Case Histories, J. Wiley & Sons, New York,
14. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/058/htm/sec_3.htm
15. http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos042/sesiones_especiales/SE15.pdf
16. <http://geo-energy.org>
17. http://www.energiandina.cl/downloads/animaciones/009_tipos_plantas.html