

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRIQUEZ UREÑA



UNPHU

Facultad de ciencia y tecnología

Escuela de ingeniería civil

“Beneficios económicos y ambientales del aprovechamiento de un yacimiento geotérmico en República Dominicana.”

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniero Civil

Sustentado por:

Elba Annetty Rodríguez Martínez

(10-0664)

Asesor:

Ing. William Read.

Santo Domingo, 2016

Dedicatoria

INDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1: Introducción

- 1.1 Planteamiento del problema
 - 1.1.1 Preguntas de investigación
- 1.2 Objetivos de la investigación
- 1.3 Antecedentes

Capítulo 2: Marco Teórico

- 2.1 Energía Geotérmica
- 2.2 Clasificación de los Recursos Geotérmicos
- 2.3. Fluidos Hidrotérmicos
- 2.4. Aplicaciones de la Energía Geotérmica y sus Antecedentes
 - 2.4.1. Aplicaciones Directas de los Recursos Geotérmicos
- 2.5. Generación de Energía Eléctrica
 - 2.5.1. Generalidades
 - 2.5.2. Sistemas de Generación Eléctrica
- 2.6. Desarrollo Mundial de la Generación Geotérmica de Electricidad

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTO TEÓRICO

- 3.1. Descripción técnica de una Planta Geotérmica
 - 3.1.1. Tipos de Plantas
 - 3.1.2. Desempeño de las Plantas de Generación

CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA PLANTA

CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO-FINANCIERO

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES AMBIENTALES

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

Capítulo I

1.1 Planteamiento del problema:

Las energías renovables son una opción sostenible y técnicamente viable de producir energía y aportan una parte significativa de la producción eléctrica en varios países. El importante y acelerado desarrollo tecnológico ha permitido reducir sus costes y ha favorecido su expansión a una escala impensable hace tan solo quince años; y sus perspectivas de crecimiento son muy favorables. En este contexto, es necesario avanzar hacia un mejor conocimiento de los efectos económicos y sociales vinculados al crecimiento de las energías renovables en un territorio determinado. La literatura académica se ha centrado principalmente en aspectos técnicos relacionados con su integración en el sistema eléctrico, pero sus impactos económicos han sido aún poco analizados. (Greenpeace, 2014)

1.1.1 Preguntas de investigación:

- ✓ ¿Qué beneficios económicos económicos permite el aprovechamiento de un yacimiento geotérmico en República Dominicana?
- ✓ ¿Cuál es el impacto ambiental que provoca el aprovechamiento de un yacimiento geotérmico en República Dominicana?
- ✓ ¿Cómo aporta al desarrollo sostenible del país?

1.2 Objetivos de la investigación:

Objetivo General:

-Definir los beneficios económicos y ambientales que puede ofrecer el aprovechamiento de un yacimiento geotérmico.

Objetivos específicos:

-Realizar la propuesta para el aprovechamiento de un yacimiento geotérmico.

-Señalar los beneficios al medio ambiente en comparación con la explotación de combustibles fósiles.

-Señalar los beneficios económicos para el desarrollo sostenible de nuestra sociedad.

Justificación:

La importancia del desarrollo sostenible de recursos geotérmicos del país se fundamenta en:

-La necesidad de diversificación de la matriz energética incorporando energías renovables en Republica Dominicana.

-La necesidad de tener energía firme y económicamente viable a partir de recursos propios.

-Beneficiar a la Republica Dominicana de energía limpia y de bajo costo.

-Contribuir al desarrollo local utilizando los aspectos ambientales.

Justificación Económica

· La justificación económica de una central geotérmica se debe a la evaluación de su costo marginal, ya que las centrales en nuestro país despachan energía de menor a mayor costo marginal. El costo marginal de una central eléctrica es prácticamente el costo del combustible empleado para producir energía eléctrica; como en una central geotérmica el combustible utilizado proviene de la naturaleza, entonces su costo marginal es muy bajo, por lo que desplazaría a otras tecnologías empleadas para la generación eléctrica.

A nivel mundial y también en nuestro país existe la iniciativa de resolver la dependencia de los combustibles fósiles ya que estos en los últimos años se han vuelto cada vez más escasos incrementando su precio por lo que bajo proyecciones puede llegar a concluir en un déficit energético. Es por lo anteriormente mencionado que se busca utilizar tecnologías no convencionales para la generación de energía incrementando así la matriz energética.

Justificación Ambiental

El uso de tecnología geotérmica es un medio eficiente para minimizar la contaminación en la producción de energía. Una planta de este tipo produce 1/6 de las emisiones de CO₂ de una central térmica a gas natural por kWh producido, por lo que generalmente cumple con los límites de emisión establecidos. Este tipo de yacimientos utiliza vapor

cuya composición incluye gases no condensables, tales como CO₂, H₂S, NH₃, CH₄, N₂ y H₂ en valores entre 2.5 y 47 g/kg (gramos de contaminante por kg de vapor). Además, este tipo de centrales no contamina (NO_x) ni (SO_x). En este contexto, el problema de contaminación del aire no aparece como crítico en los proyectos geotérmicos, anticipándose que debieran cumplir con los límites de emisiones existentes en la normativa.

Para un proyecto de esta envergadura se debe realizar un estudio de impacto ambiental, para mostrar que los factores de contaminación son casi nulos, como lo son las emisiones de CO₂, las emisiones de H₂S, emisiones de NO_x.

El Estudio de Impacto Ambiental es una evaluación que analiza la interacción presente o futura de la central geotérmica con el medio ambiente. Se tendrá en cuenta un plan de gestión ambiental el cual se hará cargo del manejo ambiental del proyecto el cual contiene diversos componentes, incluyendo medidas de mitigación de impactos ambientales durante la construcción y operación del proyecto, control de calidad, salud y seguridad ocupacional, planes de contingencia, programas sociales y desactivación de la planta.

1.3 Antecedentes

La energía geotérmica proviene del calor natural presente en el interior de la tierra es renovable y su explotación es amigable con el medio ambiente, se utiliza para la generación de electricidad en varios países de Centro América, tales como: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y México.

El Dr. John Lewis, Profesor Emérito de ciencias geológicas de la George Washington University, en Washington, D.C, manifestó que debido al último periodo de actividad volcánica de la Hispaniola, existe un gran potencial para generar energía geotérmica en el país.

El doctor Lewis dictó la conferencia “Volcanismo Reciente de la República Dominicana”, invitado por la Sociedad Dominicana de Geología (SODOGEO), en la que explicó la importancia de las ocurrencias de manantiales de aguas termales, localizados en el valle de San Juan, Valle Nuevo, Padre Las Casas y Yayas de Viajamas.

En ese orden, indicó que esas aguas termales son una evidencia de que todavía existe una fuente generadora de calor en la profundidad del subsuelo relacionada con el volcanismo reciente y, probablemente, se podría aprovechar para el desarrollo de proyectos de generación energética.

Los estudios estiman la ocurrencia de dos centros de volcanismo reciente en el país que actuaron simultáneamente, uno localizado en el valle de San Juan, donde las rocas son Máfico-Alcalina y el otro, con rocas de composición Calco-Alcalina, se encuentra en las zonas de Valle Nuevo, Padre Las Casas y Yayas de Viajamas”, puntualizó Lewis.

Finalmente el profesor universitario sugirió a las autoridades y organismos competentes, retomar las investigaciones, a través de estudios geoquímicos actualizados, ya que las últimas investigaciones fueron realizadas a principio de los años 80 y el país está ignorando una fuente de generación de energía alternativa.

La energía geotérmica es la energía proveniente del calor natural presente en el interior de la tierra, usualmente, son remanentes térmicos producto de las últimas actividades volcánicas. Este tipo de energía es renovable y su explotación es amigable con el medio ambiente, se utiliza para la generación de electricidad en varios países de Centro América, tales como: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y México.

Del Conferencista:

El Dr. John Lewis es Profesor Emérito de ciencias geológicas de la George Washington University, en Washington, D.C., USA., con más de 40 años de experiencias investigando las rocas volcánicas de la Región del Caribe; autor de numerosos artículos científicos sobre la Geología de la isla La Hispaniola. (Experto insta a profundizar estudios sobre energía Geotérmica., 2011)

1.4 Glosario

- CO₂**: dióxido de carbono es un gas incoloro, inoloro y vital para la vida en la Tierra.
- H₂S**: ácido sulfhídrico este gas, más pesado que el aire, es inflamable, incoloro, tóxico, odorífero: su olor es el de materia orgánica en descomposición, como de huevos podridos.
- NH₃**: gas de amonio o amoniaco es un compuesto químico de nitrógeno.
- CH₄**: El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo.
- N₂**: El nitrógeno molecular o dinitrógeno(N₂)₂ (generalmente llamado solo nitrógeno) es una molécula diatómica homonuclear formada por dos átomos de nitrógeno. Es un gas (a condiciones normales de presión y temperatura) que constituye del orden del 78 % del aire atmosférico.
- H₂**: Dihidrógeno, de fórmula química H₂, gas cuya molécula se compone de 2 átomos de hidrógeno.
- NO_x**: óxidos de nitrógeno se aplica a varios compuestos químicos binarios gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno.
- SO_x**: Los óxidos de azufre son un grupo de gases compuestos por trióxido de azufre (SO₃) y dióxido de azufre (SO₂). El más común es el SO₂, ya que el SO₃ es solo un intermediario en la formación del ácido sulfúrico (H₂SO₄).

1.5 NOMENCLATURA GENERAL

A continuación se describe la nomenclatura usada en los cálculos:

m = Flujo de masa, kg/s.

h = Entalpía, kJ/kg.

P = Presión, kPa.

s = Entropía, kJ/kg^{°C}.

v = Volumen específico, m³/kg.

T = Temperatura, °C.

u = Energía interna, kJ/kg.

x = Calidad del fluido o fracción del vapor en el fluido, sin unidades.

Re_{xv} = Relación de expansión en la válvula de expansión, sin unidades.

η_{at} = Eficiencia adiabática de la turbina, sin unidades.

Re_{xb} = Relación de expansión en la bomba de condensado, sin unidades.

η_{ab} = Eficiencia adiabática de la bomba de condensado, sin unidades.

ΔP_p = Pérdida de presión en el precalentador, kPa.

q_{tp} = Calor transferido del fluido geotérmico al precalentador, kW.

q_{cp} = Calor transferido del precalentador al isopentano, kW.

ΔP_v = Pérdida de presión en el vaporizador, kPa.

q_{tv} = Calor transferido del fluido geotérmico al vaporizador, kW.

q_{cv} = Calor transferido del vaporizador al isopentano, kW.

ΔP_c = Pérdida de presión en el condensador, kPa.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1 Energía Geotérmica

Según Luis Córdoba en su tesis "Diseño de una planta Geotérmica de generación eléctrica de 50mw", El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre; en este sentido utilizaremos dicho término.

La tierra se define como un sistema de fluidos en mutua interacción. La Tierra tiene distintas formas de energía intrínseca. Entre ellas, las de mayor interés son la cinética, elástica y térmica, entre las cuales además existe un intercambio permanente. La geotermia corresponde a la energía térmica interna de la Tierra. La tecnología actual permite diversas formas de aprovechamiento de esta energía con el fin de convertirla en energía útil (calor, electricidad).

La evidencia visual del calor interno de la Tierra la proporcionan fenómenos naturales como los volcanes, géiseres, fumarolas, manantiales de agua caliente y las pozas de lodo hirviente. (Figura 2.1)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.1 EVIDENCIA VISUAL DEL CALOR INTERNO DE LA TIERRA
 (a) VOLCÁN, (b) GÉISER, (c) FUMAROLA, (d) MANANTIAL DE AGUA CALIENTE, (e) POZA DE LODO HIRVIENTE
 "Introduction to Geothermal Energy Slide Show"

Este calor proviene del núcleo de la Tierra, ubicado aproximadamente a 6000 kilómetros de profundidad que posee una temperatura aproximada de 5000 °C (Figura 2.2) y que está constituido por un núcleo externo de materia fluida y otro núcleo interno de hierro sólido.

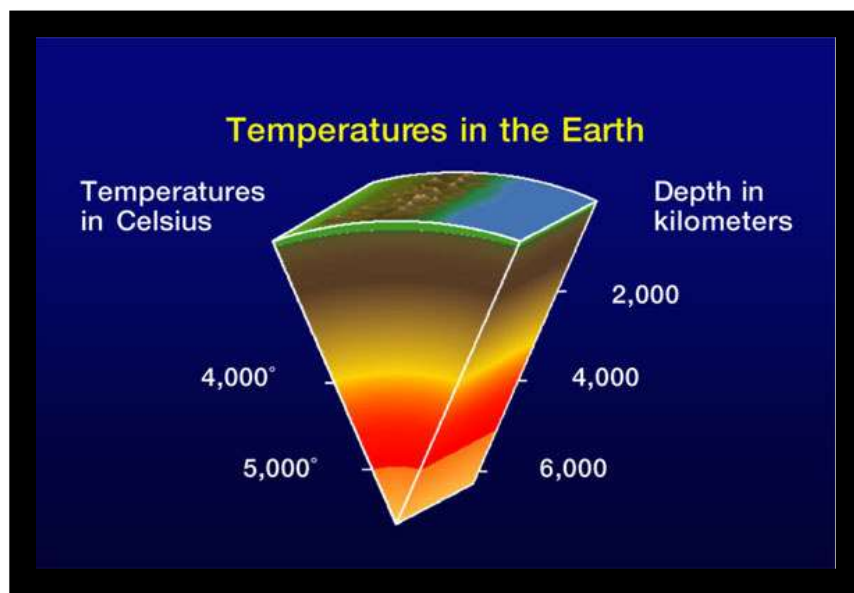


Figura 2.2 DISTRIBUCIÓN APROXIMADA DE TEMPERATURAS EN EL INTERIOR DE LA TIERRA (°C / KILOMETRO).
 "Introduction to Geothermal Energy Slide Show"

Se puede afirmar que el origen del calor terrestre está relacionado con la formación de la Tierra. La corteza terrestre actúa como una especie de aislante de las capas interiores, primero el manto y luego el núcleo (Figura 2.3).

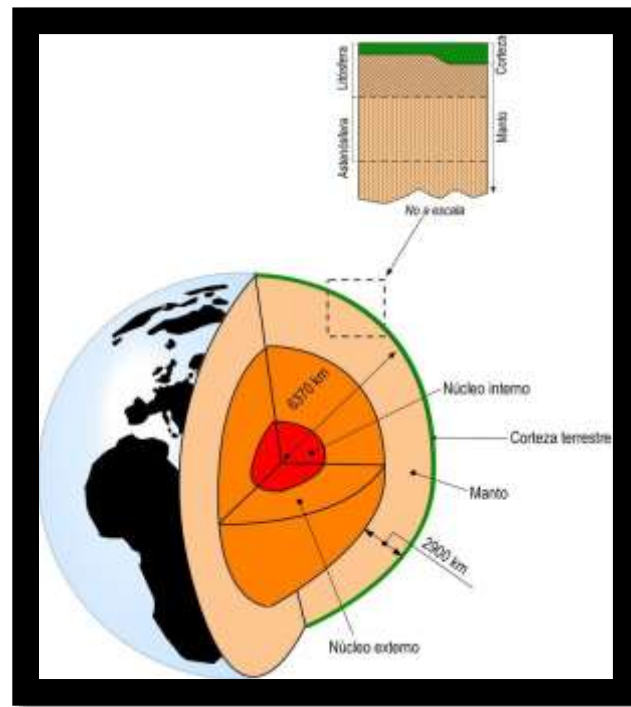


Figura 2.3 CAPAS DE LAS QUE ESTA COMPUESTA LA SUPERFICIE Y EL INTERIOR DE LA TIERRA
 “What is Geothermal Energy?”

Según estudios científicos el calor interno de la Tierra se debe principalmente a los elementos radiactivos, como potasio, uranio y torio; como también al calor residual de la formación de la Tierra y a los impactos de meteoritos.

A partir del calor que produce nuestro planeta, la teoría llamada tectónica de placas explica los fenómenos geofísicos que se presentan en la superficie, tales como sismos y volcanes, mediante este mecanismo se lleva el calor del interior a la superficie. La corteza de nuestro planeta está constituida de grandes placas de roca que se deslizan unas sobre otras (Figura 2.4).

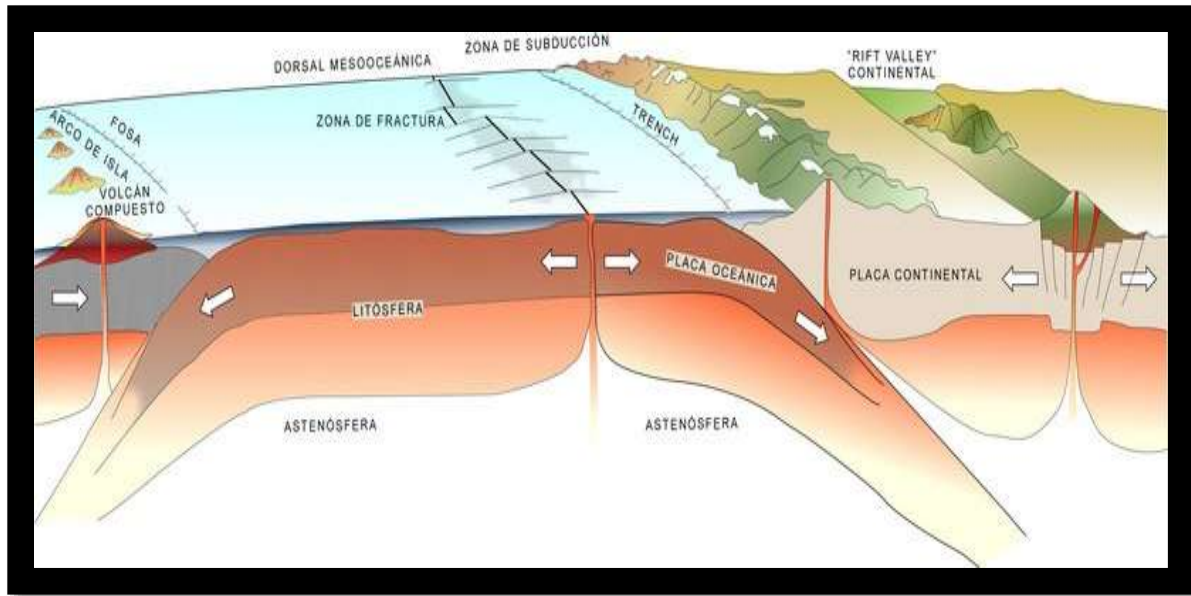


Figura 2.4 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA Y LOS FENÓMENOS QUE SE PRODUCEN POR EL MOVIMIENTO DE LAS PLACAS TECTÓNICAS.
 “What is Geothermal Energy?”

La corteza terrestre tiene un grosor de unos 5 km bajo los océanos y de entre 30 a 40 km bajo los continentes. El manto se encuentra debajo de la corteza y tiene un grosor de 2900 km. Entre la corteza y el manto existe una discontinuidad sísmica notable, debido probablemente al cambio de composición. En los últimos estudios de la geología se ha desarrollado un nuevo concepto para el volumen desde la parte más externa de la Tierra hasta una profundidad del orden de centenas de km (Modelo del planeta formado por tectónica de placas). (Figura 2.5)

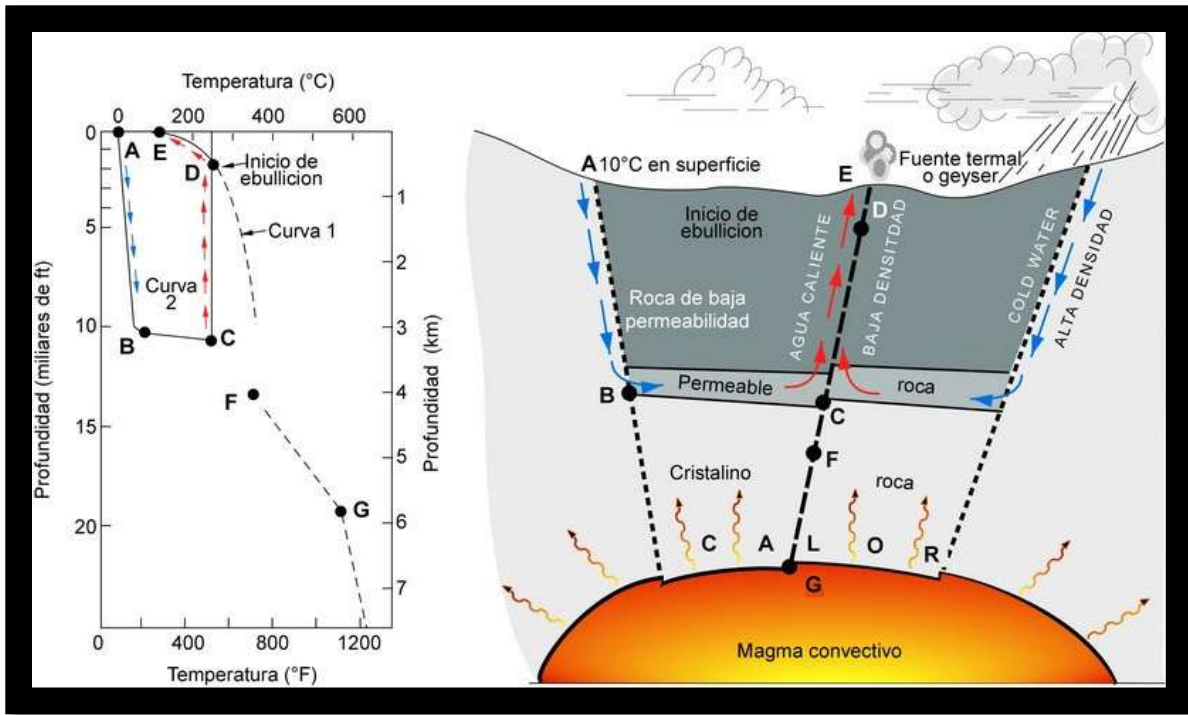


Figura 2.5 MODELO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO.
 “What is Geothermal Energy?”

Es a lo largo de los límites de separación y convergencia de las placas donde ocurre el flujo de calor terrestre anormal. La transferencia de grandes cantidades de calor mediante magmas generados en el manto lleva energía a niveles superiores de la corteza. A partir de estas fuentes de calor se desarrollan los sistemas geotérmicos.

Generalmente una placa oceánica se mete abajo de una continental, provocando fracturas en las rocas por donde pueden escapar gases y vapores de magma, sílice (SiO_2) y minerales con hierro y magnesio, formándose burbujas magmáticas que llegan a las proximidades de la superficie. Mayormente los restos del magma, pero a veces toda, asciende a la superficie terrestre, denominándosele lava.

El agua que se ha filtrado por las fisuras de la corteza, a lo largo de años, y que se encuentra cerca de una cámara magmática se calienta progresivamente, y que muchas veces viajará a la superficie de la Tierra formando géiseres o resortes calientes. Este recaudo natural de las rocas de agua caliente se denomina depósitos geotérmicos (Figura 2.6), o también acuíferos de agua caliente. Estos depósitos pueden usarse para producir energía geotérmica.

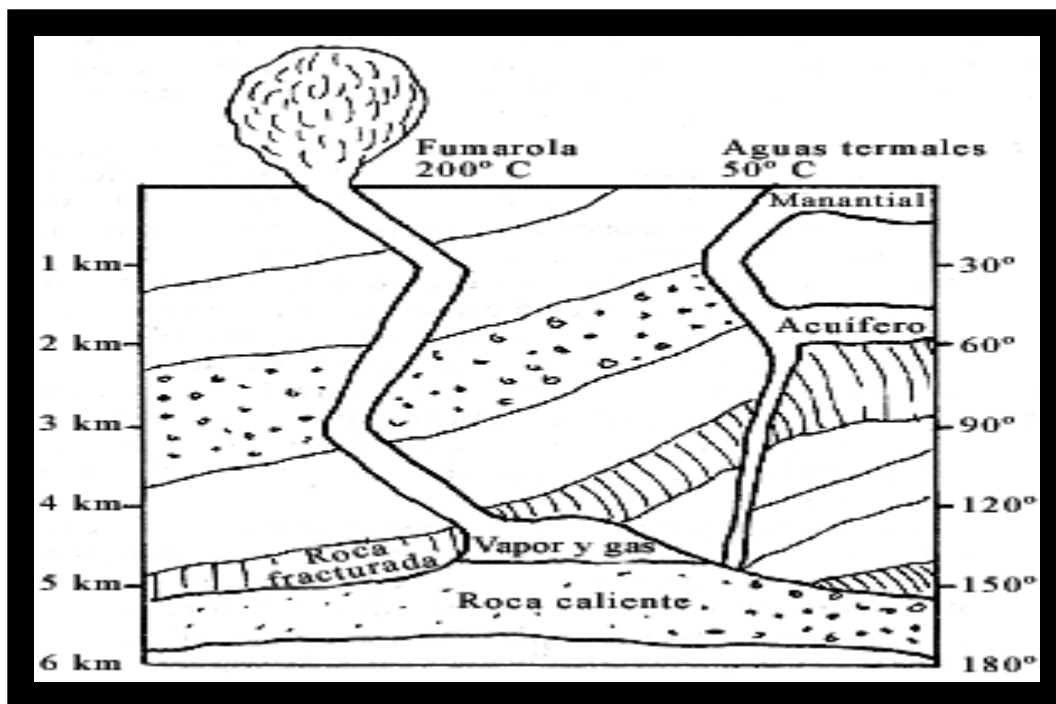


Figura 2.6 ESQUEMA GRÁFICO APROXIMADO DE UN DEPÓSITO GEOTÉRMICO
 “La Geotermia: Tetera Natural”

Por tanto la energía geotérmica es el calor de la Tierra que es liberado por conducción a un flujo promedio mundial de 82 mW/m², el cual corresponde a un flujo de 99 mW/m² en los fondos oceánicos y a 57 mW/m² en los continentes. Este calor natural se manifiesta normalmente en el aumento de la temperatura con la profundidad, siendo el gradiente promedio a nivel mundial del orden de 30 °C/km, Sin embargo, las variaciones de la temperatura no son las mismas en todos los lugares de la Tierra. De esta forma, a profundidades que oscilan entre 0 y 10 km se puede encontrar un acuífero, en el cual potencialmente puede haber agua caliente, vapor de agua o ambos (Figura 2.7).

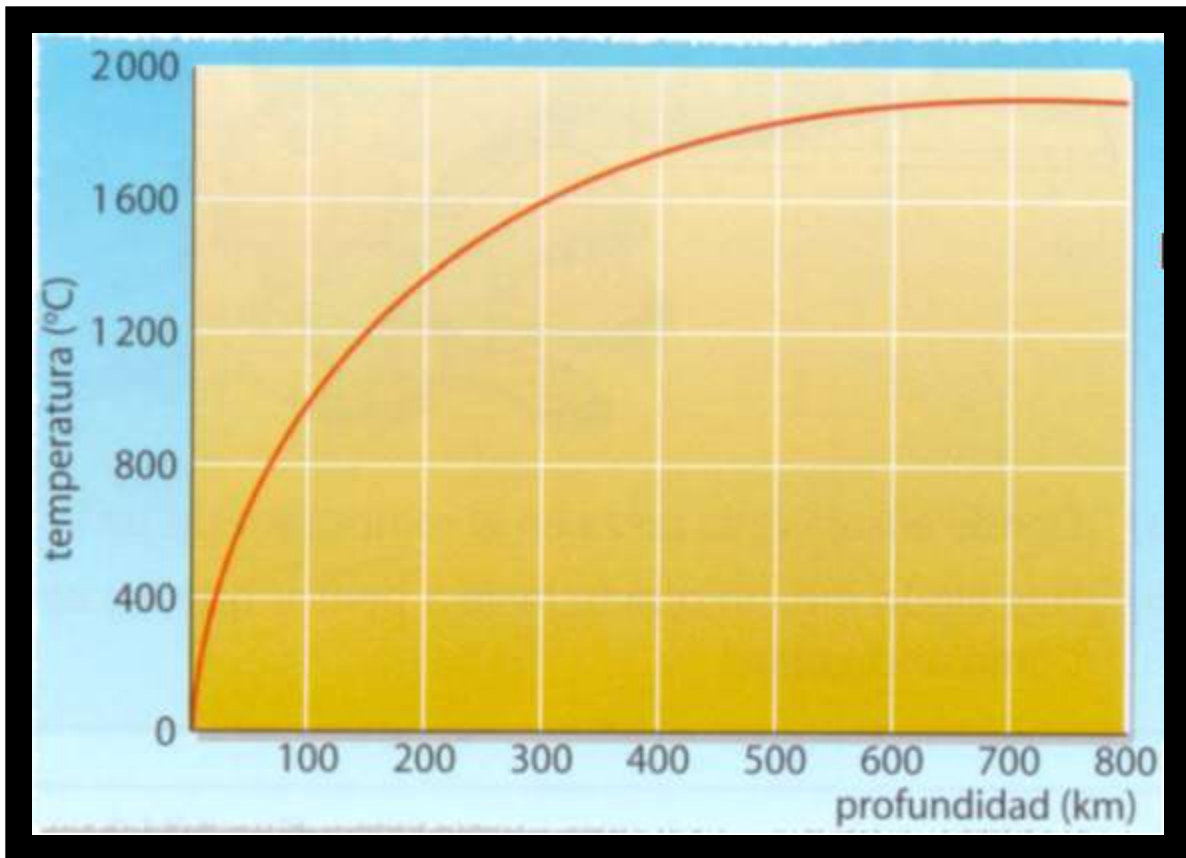


Figura 2.7 APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C) CON EL INCREMENTO DE PROFUNDIDAD (km)
 “La Energía Interna de la tierra”

2.2 Clasificación de los Recursos Geotérmicos

De acuerdo a los estudios hasta hoy realizados hay cuatro clases de recursos geotérmicos que están disponibles para ser usados como fuentes de energía, y son:

- a) Los fluidos hidrotérmicos.
- b) La roca seca caliente (HDR).
- c) Los fluidos geopresurizados.
- d) El magma.

a) Los fluidos hidrotérmicos

Estos recursos se forman cuando agua caliente y/o vapor se alberga en la roca fracturada o porosa bajo las profundidades de la corteza terrestre, de 100 m a 4.5 km, como el resultado de la intrusión en la corteza terrestre del magma y la circulación de agua a esas profundidades o cercanas a las mismas en una falla o fractura, con temperaturas desde 18°C hasta los 400°C. Los recursos de alto grado se usan comúnmente para la generación de electricidad, y los recursos de bajo grado se usan en aplicaciones de calefacción directa.

b) La roca seca caliente (HDR)

La roca seca caliente es una formación geológica caliente formada del mismo modo como los fluidos hidrotérmicos, pero sin ningún contenido de agua. Este recurso es teóricamente ilimitado y es más accesible que los recursos hidrotérmicos.

El concepto para utilizar la energía geotérmica en rocas secas calientes está en crear un depósito geotérmico artificial perforando pozos mellizos profundos en la roca. El agua de la superficie se hace circular a inyección en el depósito creado (el que calienta el agua). Hay mucha potencialidad en esta tecnología, pero aún no se ha desarrollado adecuadamente para su uso comercial.

c) Fluidos presurizados (Geopressured)

Estos recursos geotérmicos están compuestos de salmuera caliente con metano, encontrados entre grandes capas conductoras de aguas freáticas profundas. El agua y el metano se atrapan en formaciones sedimentarias a una profundidad de 3km a 6km.

La temperatura del agua está entre 90°C y 200°C. Tres formas de energía pueden obtenerse de los fluidos geopresurizados:

- ✓ La energía térmica (alta temperatura).
- ✓ La energía hidráulica (alta presión).
- ✓ La energía química (combustión del metano).

d) El magma

Es el recurso geotérmico de mayor potencial. Es la roca fundida encontrada a profundidades de 3 km a 10 km, y mayores profundidades, por lo que no es accesible. Tiene una temperatura que oscila desde 700 a 1200 °C. A la fecha no se ha desarrollado la tecnología necesaria para explotar estos recursos, siendo estas limitaciones las mayores causales que no permiten su aprovechamiento. (Cordoba, 2007)

2.3. Fluidos Hidrotérmicos

Los antecedentes aportados por las investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas de una gran cantidad de sistemas geotérmicos permiten construir un modelo básico de la estructura de estos sistemas (Figura 2.8). Aún cuando cada sistema difiera en cierta medida de los otros, su ocurrencia está condicionada por los siguientes factores básicos:

a) Fuente de Calor: Corresponde generalmente a materia magmática a unos 600-900 °C ubicado a menos de 10 Km de profundidad, desde el cual se trasmite el calor a las rocas circundantes.

b) Recarga de agua: El agua meteórica o superficial debe tener la posibilidad de infiltrarse en el subsuelo, a través de fracturas o rocas permeables, hasta alcanzar la profundidad necesaria para ser calentada.

c) Reservorio: Es el volumen de rocas permeables a una profundidad accesible mediante perforaciones, donde se almacena el agua caliente o el vapor, a través de los cuales se aprovecha el calor.

d) Cubierta impermeable: Impiden el escape de los fluidos hacia el exterior del sistema, usualmente corresponde a rocas arcillosas o a la precipitación de sales de las mismas fuentes termales.

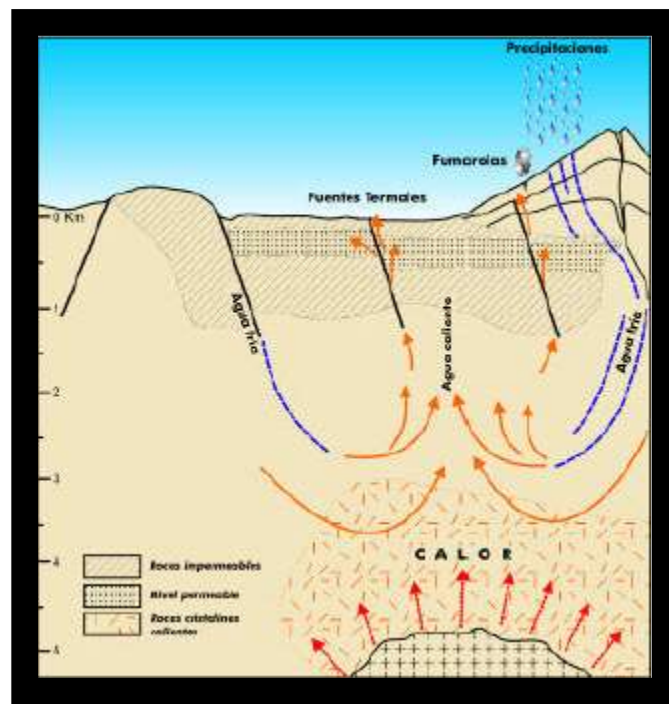


Figura 2.8 FACTORES NECESARIOS PARA LA FORMACIÓN DE CAMPOS O SISTEMAS GEOTERMALES

“La Energía Geotérmica: Posibilidades de Desarrollo en Chile”

Los fluidos hidrotérmicos que conforman los campos geotérmicos se clasifican en:

a) Reservorios geotérmicos de alta temperatura (150-400 °C): Son también conocidos como campos hipertérmicos, utilizados ampliamente en la generación de energía eléctrica. Estos se pueden clasificar también en campos húmedos o de líquido dominante y los campos secos o de vapor dominante.

b) Reservorios geotérmicos de media temperatura (70-150 °C): Son también conocidos como campos semitérmicos, son también utilizados en la generación eléctrica utilizando un fluido de trabajo más volátil que el agua.

c) Reservorios geotérmicos de baja temperatura (20-70 °C): Son también conocidos como acuíferos de bajo grado, y son utilizados generalmente en usos directos.

De acuerdo a cada una de estas clases de fluidos hidrotermales se emplea el respectivo tipo de tecnología para su uso directo e indirecto.

2.4. Aplicaciones de la Energía Geotérmica y sus Antecedentes

La generación de electricidad es la forma de utilización más importante de los recursos geotérmicos de alta temperatura (> 150°C). Los recursos de temperatura media a baja (< 150°C), son apropiados para muchos tipos diferentes de utilización.

El diagrama clásico de (Lindal, 1973; Figura 2.9), que muestra los posibles usos de los fluidos geotérmicos de diferentes temperaturas, aún se mantiene válido, pero la generación de electricidad mediante plantas de ciclo binario puede actualmente permitir la utilización de fluidos sobre 85°C.

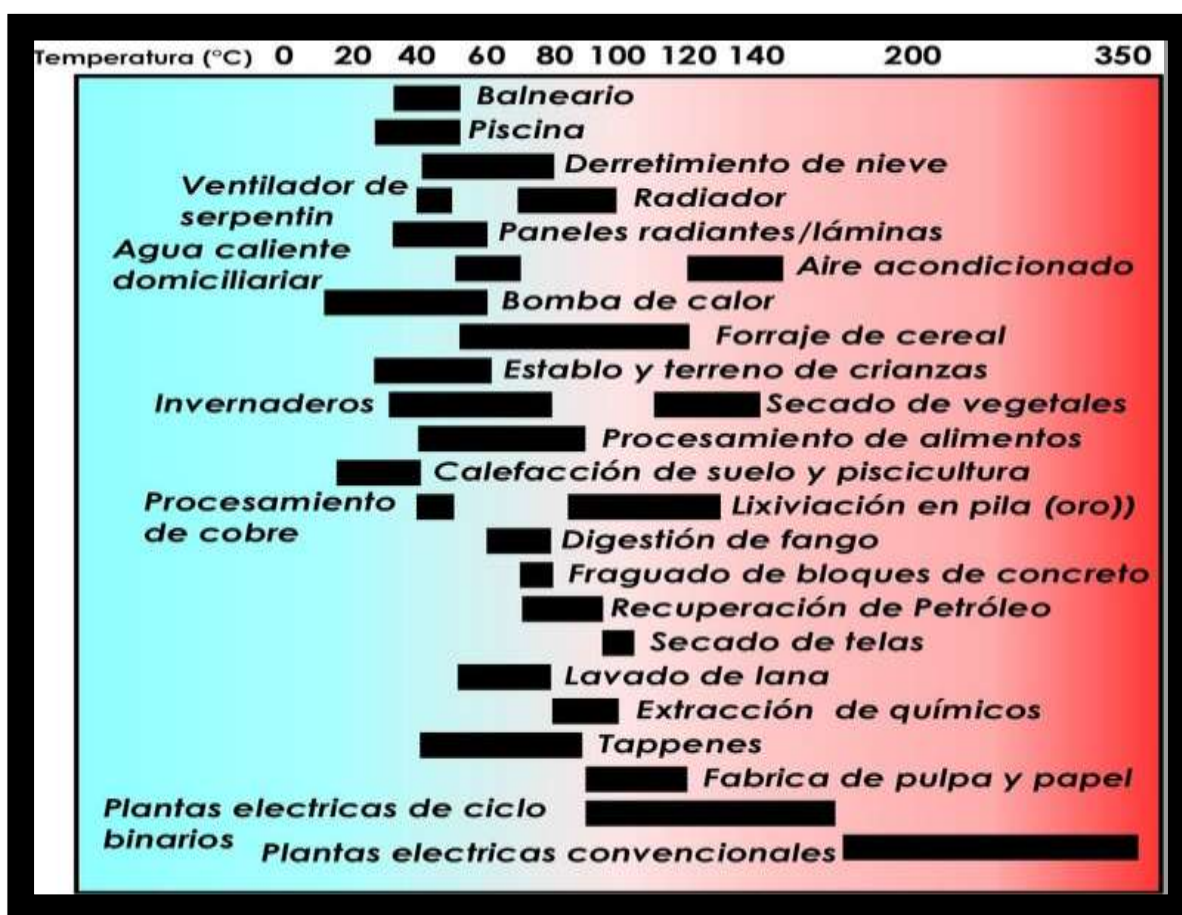


Figura 2.9 APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA, DIAGRAMA DE LINDAL, 1973

“What is Geothermal Energy?” [35]

El límite inferior de 20°C esta solamente sobrepasado en condiciones muy particulares, especialmente mediante el uso de bombas de calor. El diagrama de Lindal enfatiza dos aspectos importantes de la utilización de los recursos geotérmicos

(Gudmundsson, 1988): (a) con usos combinados y en línea es posible mejorar la factibilidad de un proyecto geotérmico y (b) la temperatura del recurso puede limitar los

posibles usos. Los diseños existentes para procesos termales pueden sin embargo, modificarse para la utilización de los fluidos geotermales en ciertos casos, ampliando así su campo de aplicaciones.

Podemos clasificar didácticamente las aplicaciones de los recursos geotérmicos en aplicaciones directas e indirectas.

2.4.1. Aplicaciones Directas de los Recursos Geotérmicos

Son aplicaciones directas aquellas en donde en principio se utiliza el calor de los recursos geotérmicos, como también la utilización de las sustancias que liberan estas fuentes. Por lo que tenemos a las siguientes:

a) Balneología

Si bien los antiguos que habitaban en las regiones termales del mundo tenían temor a las manifestaciones más violentas del calor terrestre, como los volcanes y, por lo tanto tendían a evitarlas, no tardaron mucho para explotar los fenómenos termales más benignos, en su beneficio, como los manantiales de agua caliente, que los han utilizado los etruscos durante siglos para el aseo, así como romanos, griegos, turcos, mexicanos, japoneses, maoríes y sin duda otros pueblos. Así nació la industria de la balneología, la aplicación más antigua del calor de la Tierra. (Figura 2.10).



Figura 2.10 BALNEOLOGÍA
“Geothermal Energy”

b) Servicio doméstico

Los maoríes adaptaron los fenómenos geotérmicos a sus necesidades domésticas desde que se establecieron en Nueva Zelanda en el siglo XIV.

Y su forma de vida rural tradicional en las áreas termales puede atestigüarse en la actualidad, las simples tareas domésticas se efectúa con fluidos naturales a las temperaturas apropiadas.

c) Cultivos agrícolas y acuicultura

Otra aplicación floreciente del calor terrestre fue practicada por primera vez en Islandia, utilizando aguas calientes naturales para calentar invernaderos en los que se cultivaban vegetales, fruta, hongos y flores en un país en el que tales productos no podían cultivarse debido al clima inhóspito prevaleciente (Figura 2.11).

Los EE. UU., Italia, Japón y Nueva Zelanda han desarrollado esta clase de cultivos hasta cierto grado en años más recientes, y la aplicación del calor de la tierra a la agricultura se ha extendido a la cría de animales, el calentamiento del suelo, la cría de peces, la producción de leche, la incubación de huevos, la cría de gallinas y la biodegradación de los desechos del campo.

d) Extracción de minerales

Otra aplicación muy temprana de la actividad térmica natural fue para la obtención de minerales. Los etruscos extraían ácido bórico de los manantiales hirvientes, conocidos más adelante como lagoni, se recupera azufre elemental de fumarolas en Japón y Taiwan, se extraen ácido sulfúrico y sales de amonio de fluidos termales en Japón e Italia; se han producido sal común y cloruro de calcio de salmueras calientes recuperadas de abajo de la arena del Mar Salton en el sur de California presentes en los fluidos geotermales.

e) Industria

La palabra 'industria' abarca por supuesto una gama muy amplia de actividades, muchas industrias son grandes consumidoras de calor, requiriendo algunas calor de alto grado, pero muchas más sólo de bajo grado, se ha producido una expansión continua. La primera aplicación industrial de gran escala del calor geotérmico fue iniciada en los años cincuenta en Kawerau, Isla del Norte, Nueva Zelanda, en donde los Molinos Tasman de Pulpa y Papel han venido produciendo papel durante muchos años, particularmente papel para periódico.

f) Calefacción urbana o domiciliaria y circuitos de agua caliente

Más o menos simultáneamente al desarrollo importante del campo Larderello en Italia para generación de potencia, Islandia inició una explotación en gran escala de su calor terrestre para calefacción distrital y suministro doméstico de agua caliente, no en la escala pequeña que ya se había practicado por siglos en diversas partes del mundo, sino como un sistema de suministro público en gran escala similar a las redes de distribución de electricidad y gas de las grandes ciudades (Figura 2.12).

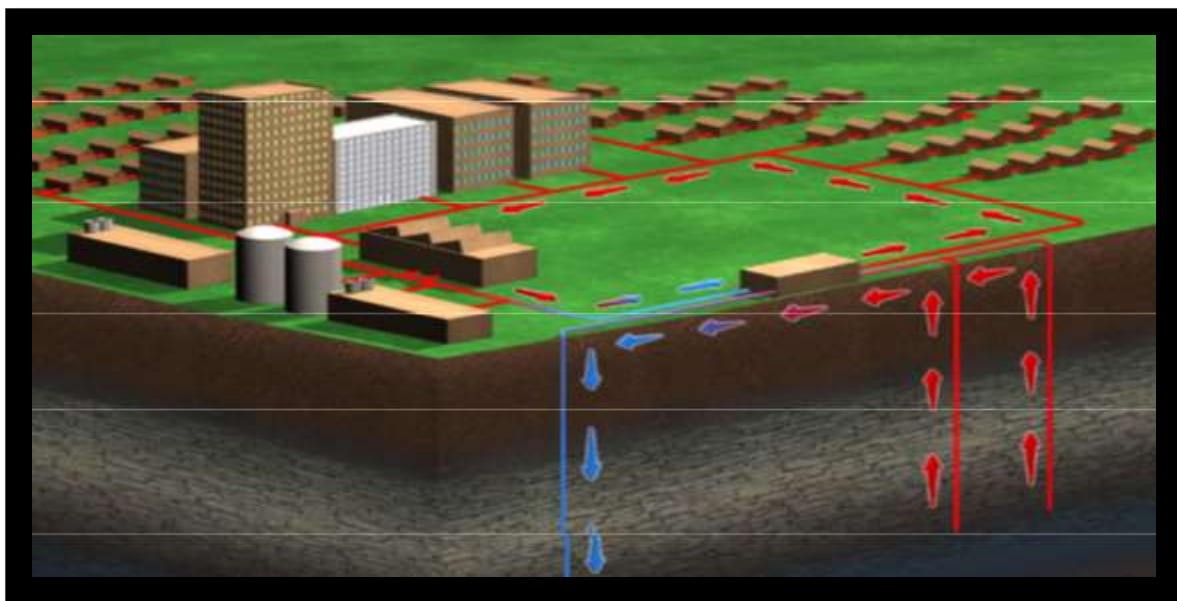


Figura 2.12 SISTEMA DE CALEFACCIÓN DISTRITAL CON FUENTES GEOTERMALES.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

La calefacción ambiental y distrital ha tenido un gran desarrollo en Islandia, donde la capacidad total de los sistemas de calefacción distrital ha aumentado a unos 1200MWt a fines de 1999 (Figura 2.13), Esta forma de calefacción está ampliamente distribuida en los países de Europa Oriental, como también en Estados Unidos, China, Japón, Francia, etc.

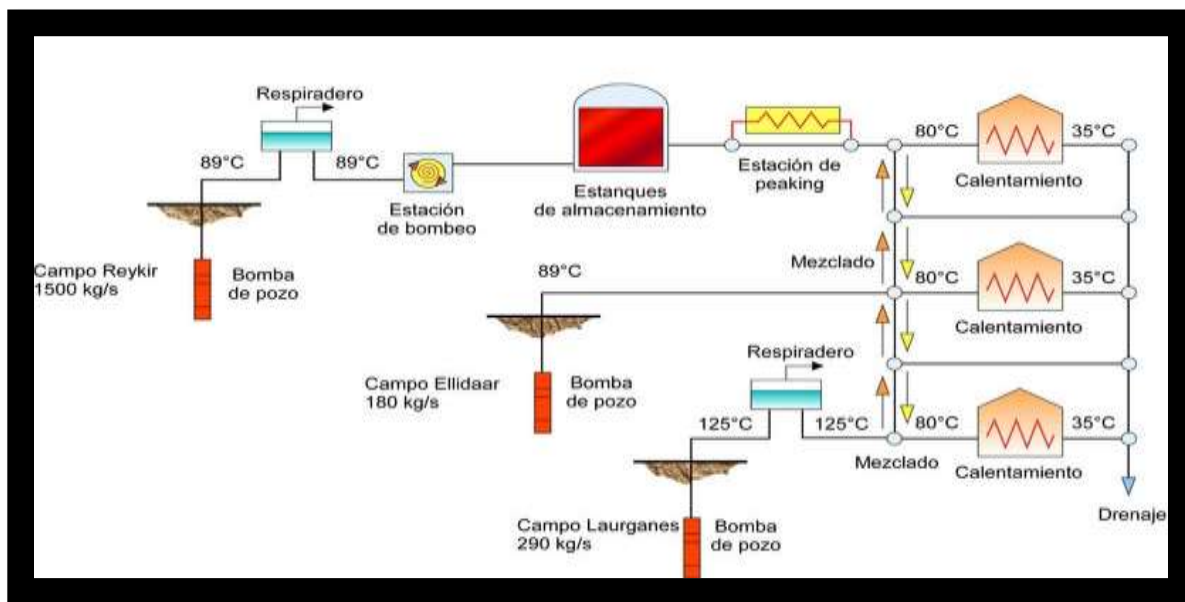


Figura 2.13 SISTEMA GEOTERMAL DE CALEFACCIÓN DISTRITAL DE REYKYAVIK.

“What is Geothermal Energy?”

g) Aplicaciones Indirectas de los Recursos Geotérmicos

Son aplicaciones indirectas en donde los recursos geotérmicos, con sus propiedades, son transformados en otro tipo de energía, es decir generación de energía eléctrica. Tuvo su primera manifestación con el invento del Príncipe Piero Ginori Conti en Larderello (Italia) en 1904. Primero se hicieron intentos de utilizar máquinas de vapor reciprocantes alimentadas con vapor de agua natural, pero tuvieron corta vida debido al intenso ataque químico. Después, se utilizaron como paso inicial intercambiadores de calor y más adelante se mejoró la calidad de los materiales usados en la manufactura de las unidades impulsoras primarias de manera que pudiera usarse el vapor de agua natural directamente sin incurrir en las pérdidas inherentes al uso de los intercambiadores de calor y así fueron superándose gradualmente los problemas químicos de la planta geotérmica de generación eléctrica

En 1913 se puso en servicio una estación de fuerza de 250 kW, y de allí en adelante tuvo lugar una expansión continua en cuanto al tamaño y número de unidades generadoras hasta que en los primeros años de la década de 1940 unos 130 MW en plantas de potencia geotérmica en Toscana alimentaban el sistema italiano de ferrocarriles eléctricos. En la actualidad hay un complejo de varias plantas geotérmicas con una capacidad instalada total que sobrepasa los 400 MW, que alimenta energía a la red integrada de la organización del estado italiano Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, conocida comúnmente como 'ENEL'.

El gobierno de Nueva Zelanda inició una exploración seria en el área de Wairakei en la Isla del Norte alrededor de 1950 y, en 1955, decidió en conjunto con el gobierno del Reino Unido emprender un proyecto de doble propósito químico y de generación de energía, que habría de producir agua pesada y 47 MW de energía eléctrica. Las operaciones de perforación comprobaron con éxito mucho más vapor de agua, por lo que el proyecto se construyó por etapas hasta una capacidad instalada total de 192 MW.

California era la siguiente región que habría de producir energía geotérmica.

Después de un inicio muy modesto, 12 MW en 1960 y un incremento de 14 MW en 1963, el desarrollo se aceleró rápidamente al comprobarse la existencia de más y más vapor. Para 1980 la capacidad total instalada de planta para generación de energía geotérmica en el campo Géiser ya había alcanzado la cifra de 943 MW (bruta). El gran éxito económico que había demostrado claramente la energía geotérmica en Italia, Nueva Zelanda y California siguieron una multitud de desarrollos similares desde la mitad de la década de 1960. Hacia fines de 1980 se habían instalado un total de 2586 MWe (brutos) de plantas de energía geotérmica en 13 países.

2.5. Generación de Energía Eléctrica

2.5.1. Generalidades

Tanto para esta aplicación como para las anteriores es muy importante saber que para llegar a explotar el potencial de un recurso geotérmico es necesaria una exploración para reconocer las zonas potenciales con este recurso y sus distintas condiciones, su composición y características (Figura 2.18).

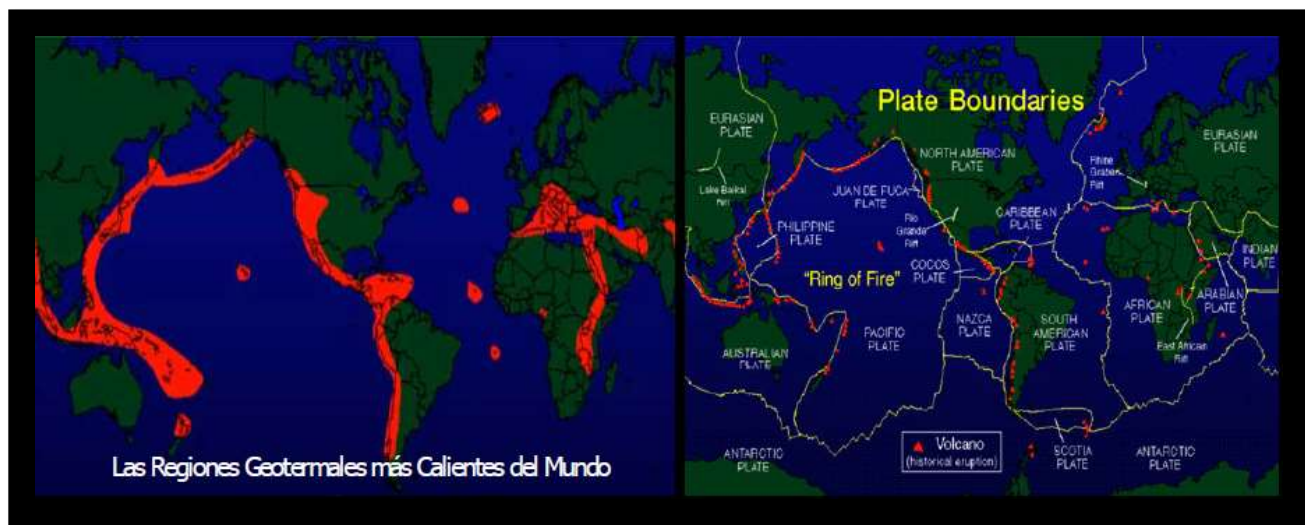


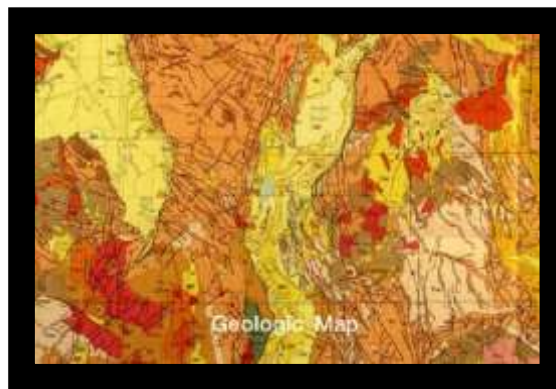
Figura 2.18 (a) REGIONES DE GRAN POTENCIAL GEOTERMAL, (b) ZONAS VOLCÁNICAS DEL MUNDO (MANIFESTACIONES VISUALES DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO).

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

La exploración de yacimientos geotérmicos permite localizar aquellos lugares en los que es posible encontrar agua o vapor a temperaturas elevadas y a profundidades cercanas a la superficie. Como la perforación de un pozo geotérmico potencial es muy costosa, se utilizan métodos indirectos que permiten aproximarse poco a poco al posible lugar en cuestión (Figura 2.19).



(a)



(b)

Figura 2.19 (a) IMÁGENES SATELITALES Y FOTOGRAFÍAS AÉREAS, (b) MAPA GEOLÓGICO

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

Entre los métodos indirectos podemos mencionar:

- La obtención de imágenes infrarrojas del lugar desde satélites y después desde aviones, es decir, utilizando la técnica denominada percepción remota.
- El análisis geoquímico de muestras de roca, se examinan las piedras y se hace un mapa geológico con el tipo de piedra y sus edades con colores diferentes.
- La medición directa de la temperatura con termómetros enterrados en el suelo.
- La creación de un modelo geológico tridimensional del yacimiento.
- Las mediciones de la resistividad eléctrica del suelo y la densidad relativa de las rocas, gravimetría, y la reflexión y refracción de las ondas sísmicas, a partir de mediciones naturales o artificiales, con explosivos.

Una vez que se han agotado los métodos indirectos se procede a la perforación del pozo, que es similar a la de un pozo petrolero (Figura 2.20).

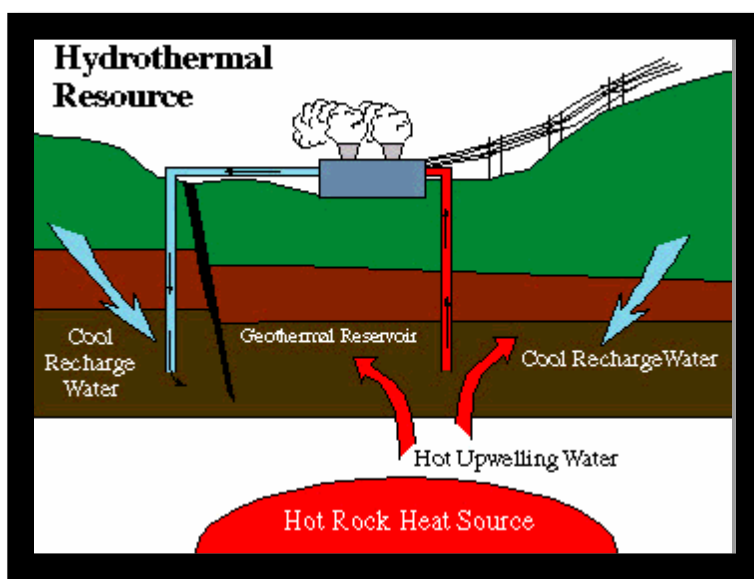


Figura 2.20 SISTEMA GENERAL GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RECURSOS GEOTÉRMICOS.
"Geothermal Energy"

Los pozos geotérmicos pueden ser de tres tipos:

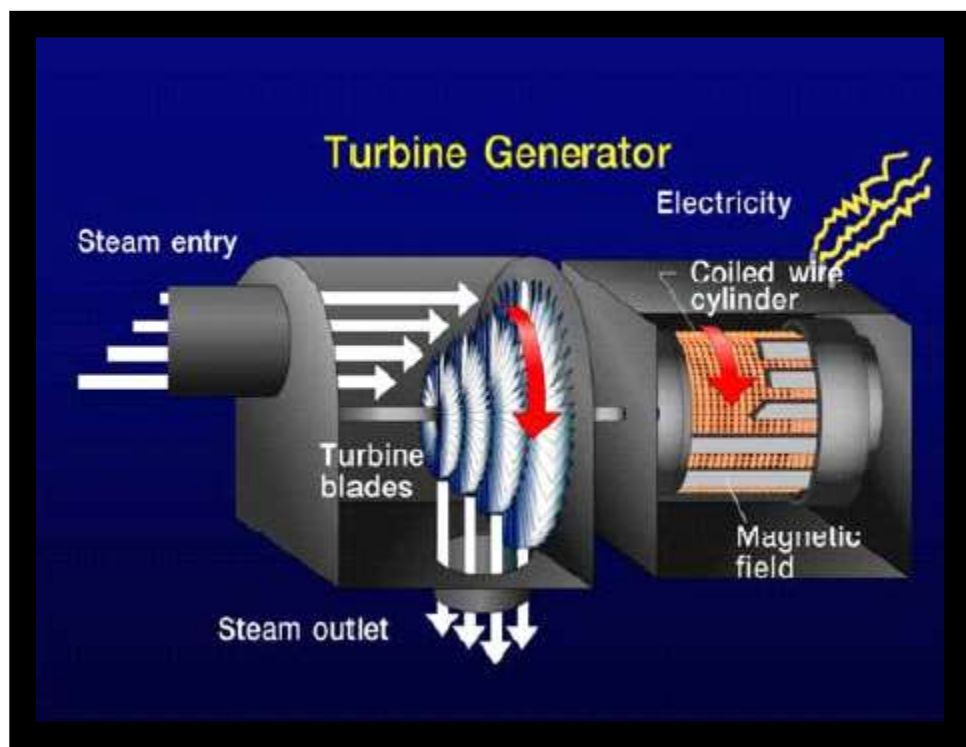
- ✓ De vapor.
- ✓ De líquido (agua caliente)
- ✓ De una mezcla de vapor y líquido.

Los yacimientos geotérmicos que contienen líquido y vapor son los más difíciles de explotar, dado que el agua contiene sales disueltas y forma una mezcla llamada salmuera. Ésta ocasiona grandes problemas de corrosión en las instalaciones

geotérmicas, que deben resolver los ingenieros especializados en geotermia, si quieren que una planta tenga un mayor tiempo de vida útil.

Por ejemplo el funcionamiento de una central geotérmica, bajo un sistema Flash Steam, es generalmente como sigue:

- ✓ Se explotan varios pozos geotérmicos, de los que se obtiene agua caliente y vapor, que llegan a un separador.
- ✓ Posteriormente, mediante un proceso de centrifugación se separa el vapor y el agua.
- ✓ El vapor de alta presión obtenido se envía a una turbina especialmente diseñada para trabajar con vapor geotérmico (si se quiere generar la misma cantidad de electricidad las turbinas deben admitir un volumen mayor del que se requiere en una central convencional).
- ✓ La energía del vapor se transforma en energía cinética de rotación en la turbina, que gira a miles de revoluciones por segundo.
- ✓ La turbina se une a través de un eje, llamado rotor, a un generador capaz producir energía eléctrica (Figura 2.21).



(a)



(b)

Figura 2.21 (a) ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN TURBOGENERADOR GEOTÉRMICO A VAPOR, (b) TURBOGENERADOR EN LA PLANTA GEOTÉRMICA VALLE IMPERIAL EN CALIFORNIA.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

- ✓ Sin embargo, una vez que se ha utilizado el vapor, éste pasa a un condensador, lo cual permite que la planta proporcione más potencia, en lugar de descargarlo a la atmósfera.
- ✓ Del condensador se extraen los gases que no se pueden condensar y se eliminan a la atmósfera (CO₂ y SO₂); el agua obtenida del condensador se bombea para su utilización posterior.
- ✓ A continuación, el agua separada se conduce a otros separadores y evaporadores de baja presión, lo cual posibilita producir energía eléctrica adicional.
- ✓ El agua de los condensadores pasa a una torre de enfriamiento y el calor obtenido en ésta se aprovecha para que trabajen los evaporadores (Figura 2.22).

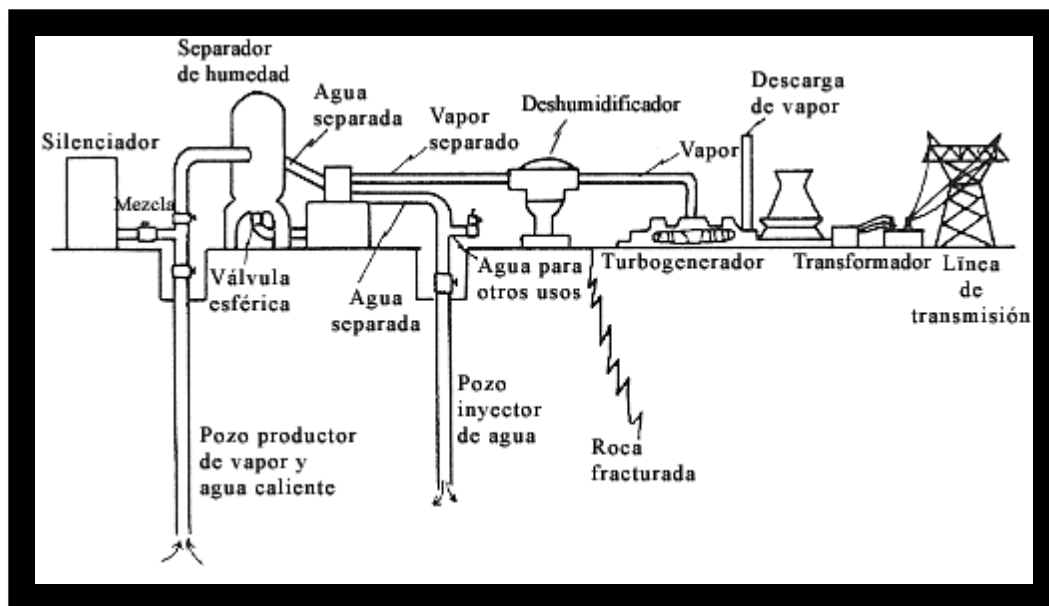


Figura 2.22 DIAGRAMA DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA.
 “La Geotermia Tetera Natural” [17]

Por otro lado, el agua de desecho se envía a una laguna, llamada de evaporación, aunque también se puede tratar para obtener sustancias como ácido bórico, gas carbónico, agua pesada, cloruro de calcio, bicarbonato, sulfato de amonio y cloruro de potasio. También se puede usar en la pesca, dado que un depósito de agua caliente es adecuado para la crianza de peces. Sin embargo, en algunas centrales geotérmicas el agua se reinyecta para evitar la contaminación de algunos subproductos geotérmicos. La producción mundial de electricidad a través de centrales geotérmicas fue de 4 760 MW. USA ocupa el primer lugar, seguido de las Filipinas y México ocupa el tercer lugar en la producción de electricidad a partir de energía geotérmica. Italia fue el primer país que instaló una central geotérmica, la de Larderello construida por Piero Ginori Conti, en 1904; luego Nueva Zelanda y después en tercer lugar México.

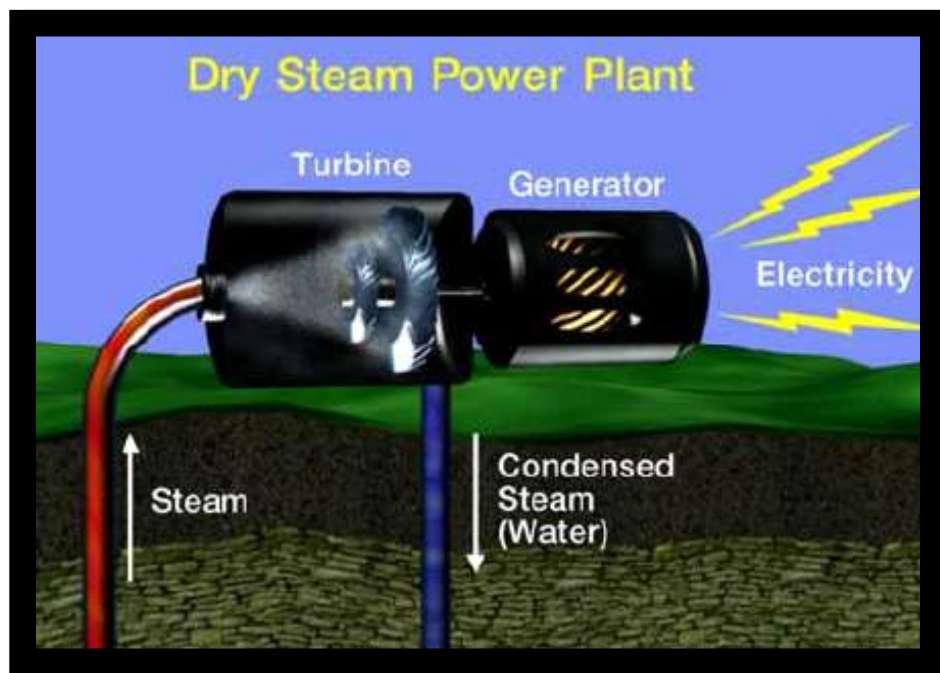
2.5.2. Sistemas de Generación Eléctrica

Al sacar vapor o agua caliente desde depósitos geotérmicos se produce una fuerza que hace girar el generador de la turbina y producir electricidad. El agua geotérmica no usada se devuelve al depósito, mediante inyección, para ser recalentada y para mantener la presión necesaria. Hay tres tipos básicos de plantas geotérmicas: Dry Steam, Flash Steam y Binary Cycle.

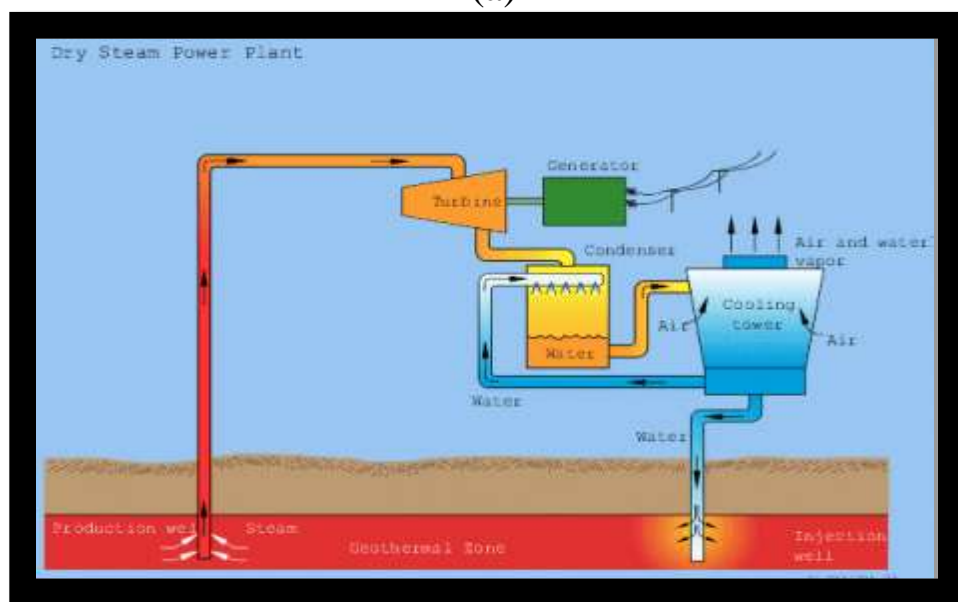
a) Sistema Dry Steam

La Planta usa un depósito de vapor con muy poca agua. El vapor se envía a través de tubos directamente a las turbinas, que manejan un generador eléctrico. Un ejemplo de este tipo de planta es The Geysers en California del Norte. 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 °C - 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 (Figura 2.23).



(a)



(b)

Figura 2.23 (a) ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA DRY STEAM, (b) ESQUEMA DE PRINCIPIO DE UN SISTEMA DRY STEAM.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

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 agrega al costo de operación.

El príncipe Piero Ginori Conti inventó la primera planta de potencia geotérmica en el campo de vapor seco de Larderello en Italia. Las primeras plantas de potencia geotérmica en los EE.UU. fueron construidas en 1962 en el campo de vapor seco The Geysers, en California del Norte; éste es el más grande campo de producción geotérmica del mundo (Figura 2.24).



(a)



(b)

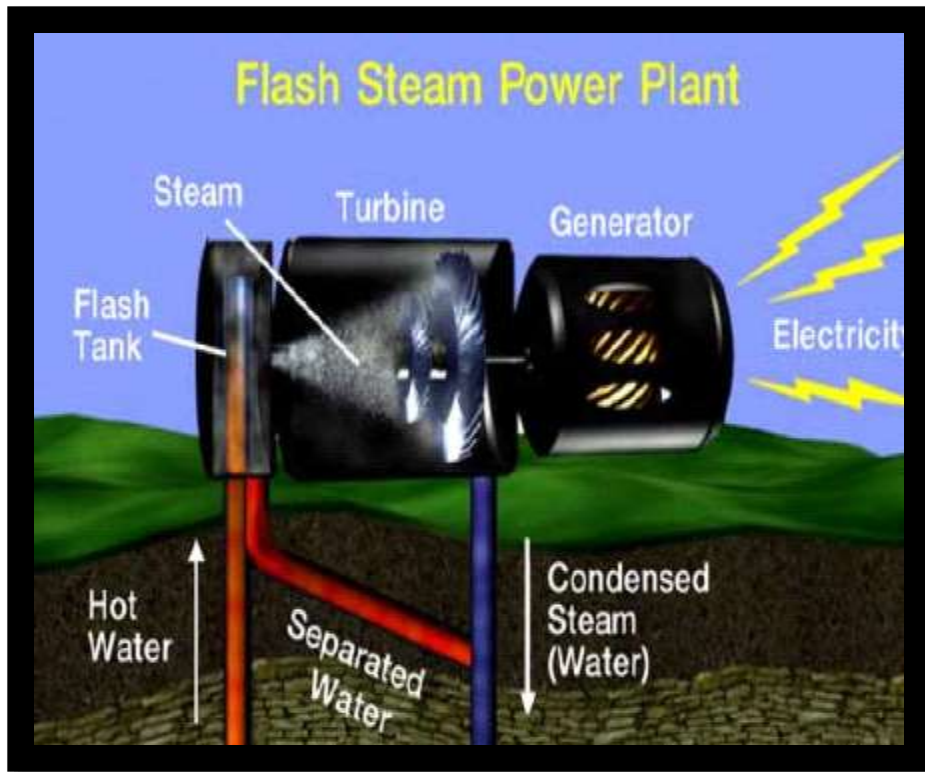
Figura 2.24 (a) PRIMERA PLANTA DE POTENCIA GEOTÉRMICA, 1904, LARDERELLO, ITALIA, (b) CAMPO DE VAPOR SECO THE GEYSERS, EN CALIFORNIA DEL NORTE.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

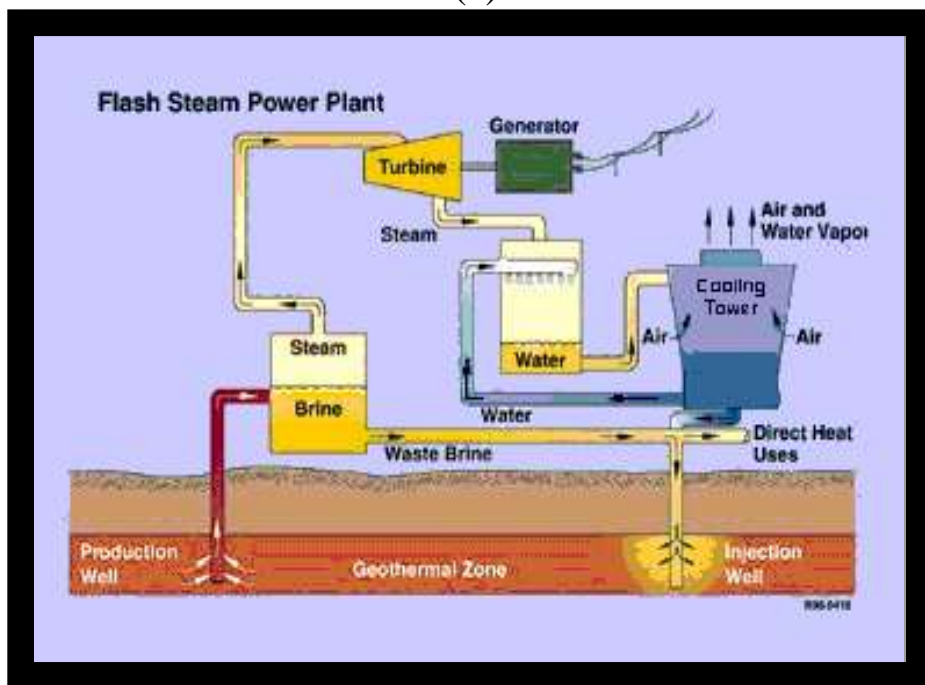
b) Sistema Flash Steam

Usa un depósito geotérmico constituido de agua a una temperatura entre 300 y 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 aún más energía.

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 (Figura 2.25).



(a)



(b)

Figura 2.25 (a) ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA FLASH STEAM, (b) ESQUEMA DE PRINCIPIO DE UN SISTEMA FLASH STEAM.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

La tecnología Flash Steam se inventó en Nueva Zelanda. Las plantas Flash Steam son las más comunes, ya que la mayoría de los recursos geotermales son de agua dominante. 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 destellado 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; con lo cual se logra aumentar el rendimiento en un 20–25%, con un 5% de aumento en los costos de planta. Un ejemplo de este tipo de plantas es la del Valle Imperial en California. Grandes volúmenes de minerales se encuentran en los depósitos geotérmicos de California del sur que proporcionan subproductos vendibles como sílice y zinc (Figura 2.26).



(a)



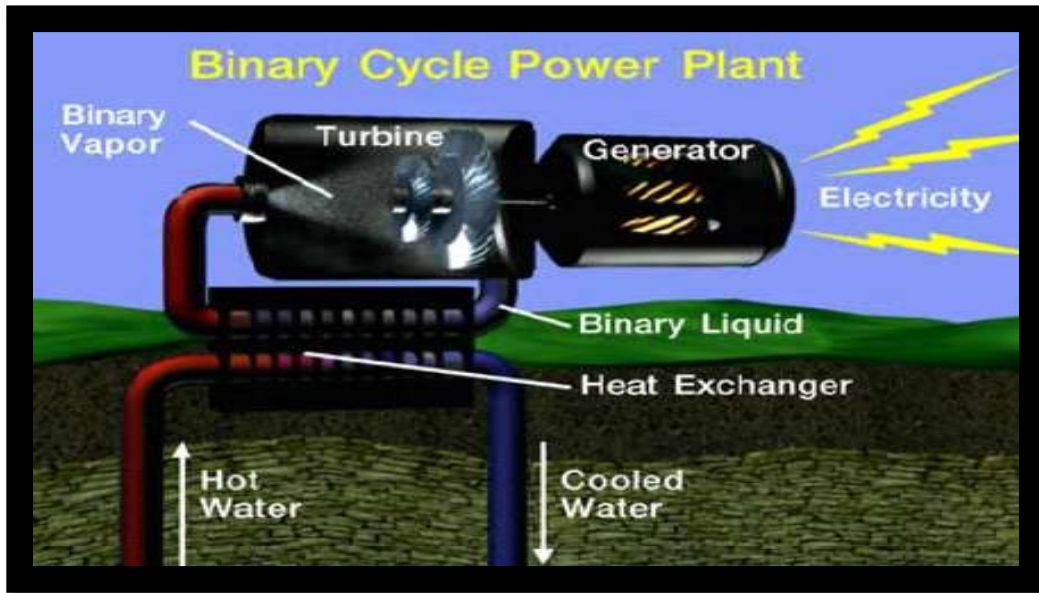
(b)

Figura 2.26 (a) PLANTA FLASH STEAM UBICADA EN LA COLINA ORIENTAL, CALIFORNIA, (b) PLANTA DE POTENCIA GEOTÉRMICA FLASH STEAM DEL VALLE IMPERIAL, CALIFORNIA.

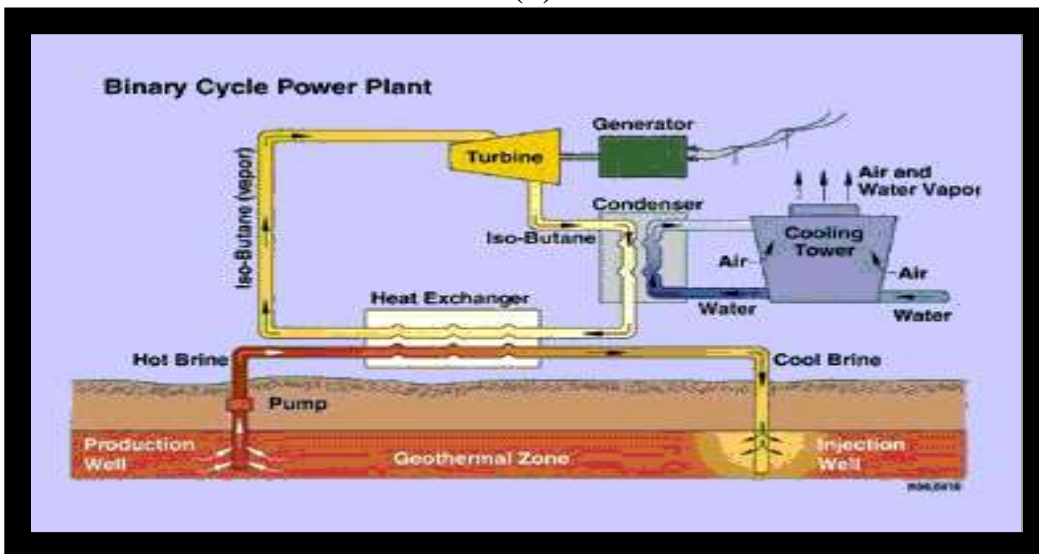
“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

c) Sistema Binary Cycle.

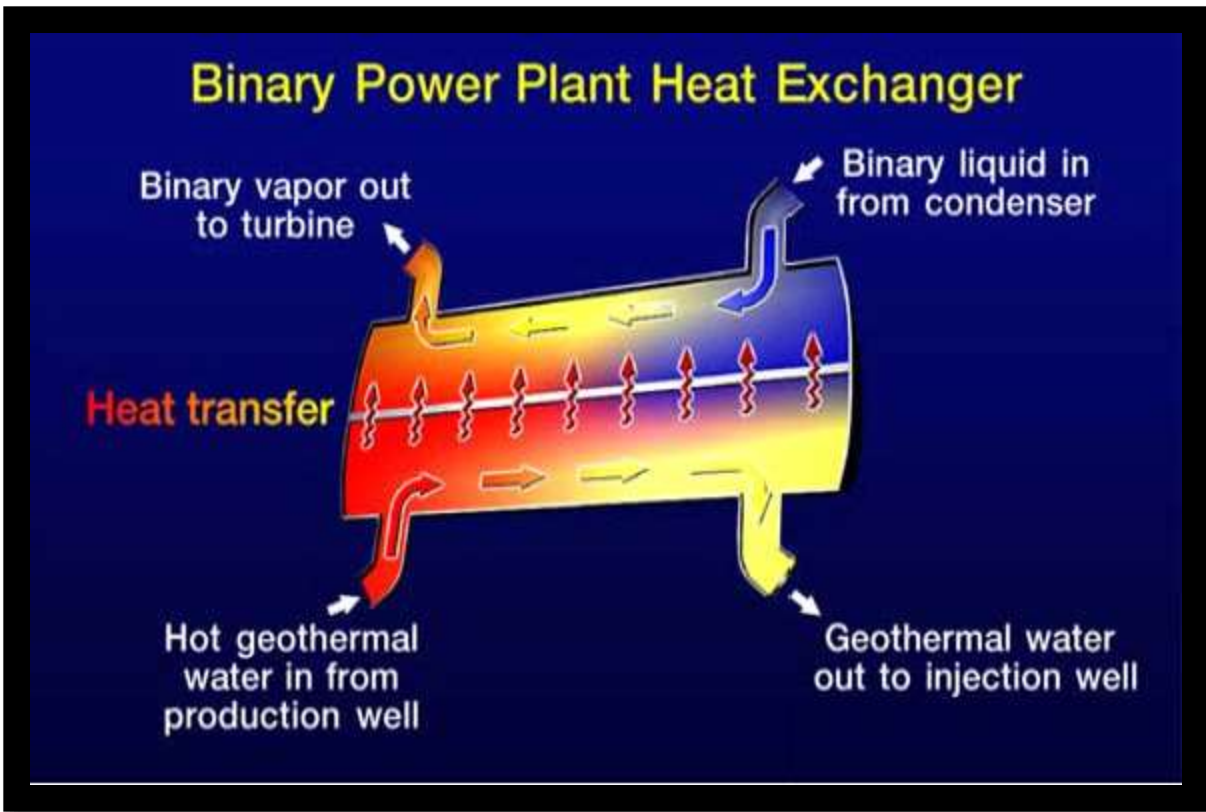
Se utiliza un depósito de agua con temperaturas entre 250 y 360°F. En este tipo de sistema, el agua geotérmica se pasa mediante un intercambiador de calor, donde su calor se transfiere en un segundo líquido, que tiene un punto de ebullición inferior al del agua (isobutano o isopentano) (Figura 2.27).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.27 (a) ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA BINAY CYCLE,
 (b) ESQUEMA DE PRINCIPIO DE UN SISTEMA BINARY CYCLE,
 (c) INTERCAMBIADOR DE CALOR DE UN SISTEMA BINARY CYCLE.

"Introduction to Geothermal Energy Slide Show"

Las plantas binarias tienen varias ventajas:

- 1) El fluido de trabajo (comúnmente isobutano o isopentano) hierve y se convierte en vapor a una temperatura inferior que la del agua.
- 2) El sistema binario usa el agua del pozo más eficientemente, debido a que el agua caliente viaja mediante un sistema más corto.
- 3) Las plantas con sistema Binary Cycle prácticamente no tienen emisiones. Este tipo de planta geotérmica se encuentra en Soda Lake, Nevada. En Hawai existe una planta geotérmica, la cual es un híbrido del Ciclo Binario y del Flash Steam. Un ejemplo con potencia pequeña está en Colmillo, Tailandia (Figura 2.28).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.28 (a) PLANTA DE SISTEMA BINARY CYCLE EN SODA LAKE, NEVADA, (b) PLANTA DE POTENCIA GEOTÉRMICA EN LA GRAN ISLA DE HAWAI, (c) PLANTA GEOTÉRMICA EN COLMILLO, TAILANDIA.
“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”

2.6. Desarrollo Mundial de la Generación Geotérmica de Electricidad

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.

NATION	1995 MWe	2000 MWe	2005 est. MWe	NATION	Installed MWe	GWh Generated	% of National Capacity
Argentina	0.7	0	n/a	Australia	0.17	0.9	n/a
Australia	0.2	0.2	n/a	China	29	100	n/a
China	29	29	n/a	Costa Rica	142	592	7.77
Costa Rica	55	142	161	El Salvador	161	800	15.39
El Salvador	105	161	200	Ethiopia	9	30	1.93
Ethiopia	0	9	9	France	4	n/a	n/a
France	4	4	20	Guatemala	33	216	3.68
Guatemala	0	33	33	Iceland	170	662	13.36
Iceland	50	170	170	Indonesia	589	4,575	3.04
Indonesia	310	589	1987	Italy	785	4,403	1.03
Italy	632	785	946	Japan	547	3,532	0.23
Japan	414	547	567	Kenya	45	366	5.29
Kenya	45	45	173	Mexico	753	5,681	2.11
Mexico	753	753	1080	New Zealand	437	2,268	5.11
New Zealand	286	437	437	Nicaragua	70	583	16.99
Nicaragua	70	70	145	Philippines	1,909	9,181	n/a
Philippines	1,227	1,909	2,673	Portugal	16	n/a	0.21
Portugal	5	16	45	Russia	23	85	0.01
Russia	11	23	125	Thailand	0.3	n/a	n/a
Thailand	0.3	0.3	0.3	Turkey	20	n/a	n/a
Turkey	20	20	250	USA	2,228	15,470	0.25
USA	2,817	2,228	2,376				
TOTAL	6,833	7,974	11,398	TOTAL	7,974	48,545	

(a)

(b)

Tabla 2.1 (a) POTENCIAL GEOTÉRMICO-ELÉCTRICO: 1995, 2000 Y EST. 2005, (b) DESPACHOS DE ENERGÍA GENERADA EN EL 2000
“Geothermal Energy” [11]

Los países que utilizan la energía geotérmica para generar electricidad aparecen en la Tabla 2.1, la cual incluye la capacidad eléctrica instalada en 1995 (6833 MWe), en el 2000 (7974 MWe). La misma Tabla también reporta la capacidad total instalada estimada para el 2005 (11398 MWe). La capacidad instalada en países en vía de desarrollo en 1995 y 2000 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 (Figura 2.29). 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 1495 MWe, mostrando una tasa de incremento durante estos 2 períodos de 500% y 223% respectivamente. En los siguientes diez y seis años, de 1984 al 2000, hubo un incremento de casi 150%. La geotermoelectricidad 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.

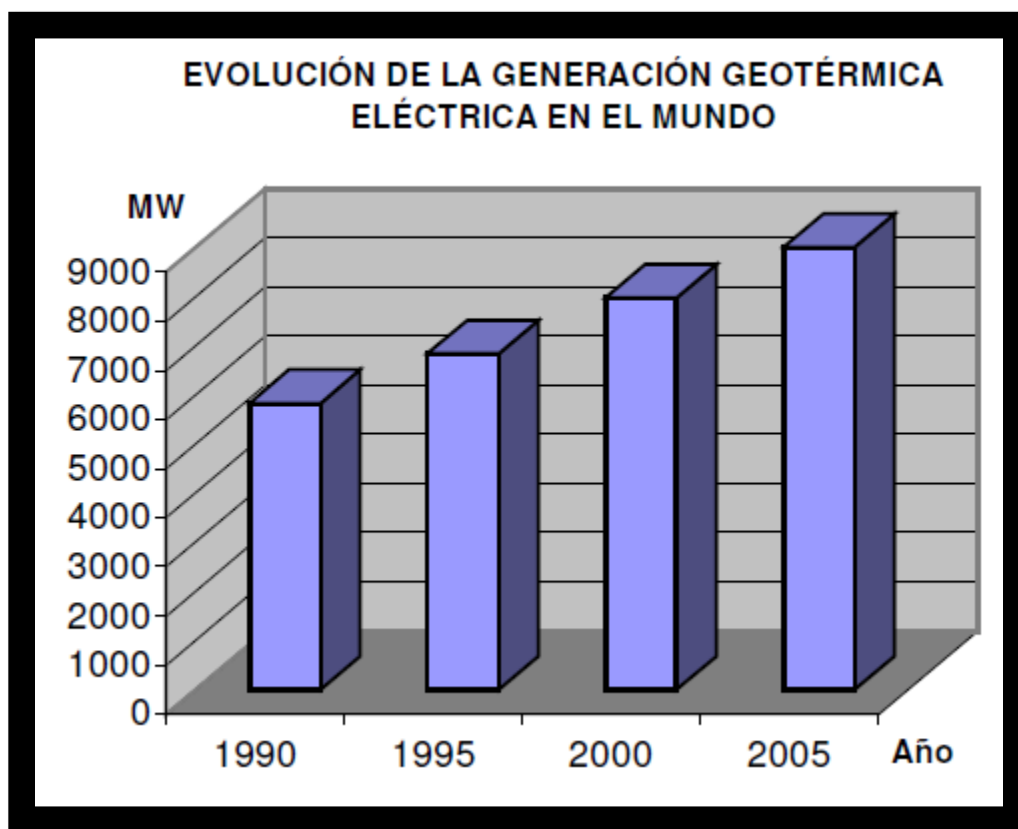


Figura 2.29 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA ELÉCTRICA EN EL MUNDO.

Elaboración propia a partir de "What is Geothermal Energy"

País	Energía térmica instalada (MWt)	Energía (TJ/año)
Algeria	100	1586
Argentina	25.7	449
Armenia	1	15
Australia	34.4	351
Austria	255.3	1609
Belgium	3.9	107
Bulgaria	107.2	1637
Canada	377.6	1023
Caribbean Islands	0.1	1
Chile	0.4	7
China	2282	37 908
Colombia	13.3	260
Croacia	113.9	555
Czech Republic	12.5	128
Denmark	7.4	75
Egypt	1	15
Finland	80.5	484
France	326	4895
Georgia	250	6307
Germany	397	1568
Greece	57.1	385
Guatemala	4.2	117
Honduras	0.7	17
Hungary	472.7	4086
Iceland	1469	20170
India	80	2517
Indonesia	2.3	43
Israel	63.3	1713
Italy	325.8	3774
Japan	1167	26933
Jordan	153.3	1540
Kenya	1.3	10
Korea	35.8	753
Lithuania	21	599
Macedonia	81.2	510
Mexico	164.2	3919
Nepal	1.1	22
Netherlands	10.8	57
New Zealand	307.9	7081
Norway	6	32
Peru	2.4	49
Philippines	1	25
Poland	68.5	275
Portugal	5.5	35
Romania	152.4	2871
Russia	308.2	6144
Serbia	80	2375
Slovak Republic	132.3	2118
Slovenia	42	705
Sweden	377	4128
Switzerland	547.3	2386
Thailand	0.7	15
Tunisia	23.1	201
Turkey	820	15756
United Kingdom	2.9	21
USA*	3766	20302
Venezuela	0.7	14
Yemen	1	15
Total	15145	190699

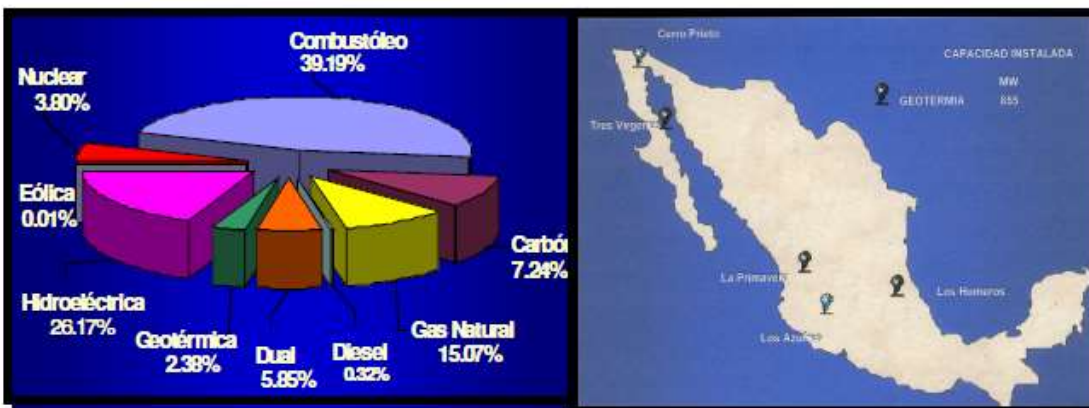
Tabla 2.2 USOS NO ELÉCTRICOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO: AÑO 2000
 “What is Geothermal Energy”

En cuanto a los usos no eléctricos de la energía geotérmica, la Tabla 2.2 muestra la capacidad instalada (15145 MWt) y la energía utilizada (190699 TJ/año) en el mundo durante el año 2000. Ese mismo año, 58 países informaron acerca de usos directos, en comparación con los 24 países que informaron en 1985, y los 28 países en 1995. El uso no eléctrico más común en el mundo corresponden a bombas de calor (34,80%),

seguido de baños (26,20%), calefacción (21,62%), invernaderos (8,22%), acuicultura (3,93%) y procesos industriales (3,13%). (Cordoba, 2007)

Desarrollo en América Central

El potencial para algunos campos geotérmicos en la América Central se estima en cerca de 3000-5000 MW. Existe información relativa a diversos esfuerzos de prospección de recursos a nivel de geología así como de prospección de campo en diversos países. México produce un 11.7% (5681 GWh) de la energía geotérmica eléctrica del mundo en el 2000 (Figura 2.34).



(a)

(b)

Figura 2.34 (a) FUENTES ENERGÉTICAS EN MÉXICO, (b) POTENCIA INSTALADA DE LAS PLANTAS GEOTÉRMICAS EN MÉXICO

“Estrategias de Comisión Federal de Electricidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero”

La experiencia de Nicaragua es de interés. Los primeros estudios para aprovechar la energía geotérmica se iniciaron en Nicaragua a finales de los años 60, para tomar un gran impulso a partir del año 1973, cuando la crisis del petróleo impactó negativamente en la balanza comercial del país. La explotación comercial de este recurso comenzó en el año 1983, con la puesta en operación de la planta geotérmica de Momotombo, la cual tiene actualmente una capacidad de 70 MW. Los recursos geotérmicos en este país se calculan en 3000 MWe. (Cordoba, 2007)

CAPÍTULO 3 FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Descripción técnica de una Planta Geotérmica

3.1.1. Tipos de Plantas

a) Plantas tipo Vapor Directo (Direct Steam)

Las plantas de este tipo usan reservas de vapor seco, el cual puede ser saturado o sobrecalentado, el cual lleva cierta cantidad de gases no condensables de composición y concentración variable.

El vapor es llevado de varios pozos a través de una tubería a la casa de máquinas donde es usado directamente en turbinas tipo impulso/reacción. Entre la boca del yacimiento y la planta existen separadores centrífugos situados cerca del yacimiento para remover partículas tales como polvo y sólidos tales como pedazos de piedras; a lo largo de la tubería se instalan puntos de drenaje para remover la condensación de vapor que se forma durante la transmisión, y así remover la humedad a la entrada de la casa de máquinas (Figura 3.1).

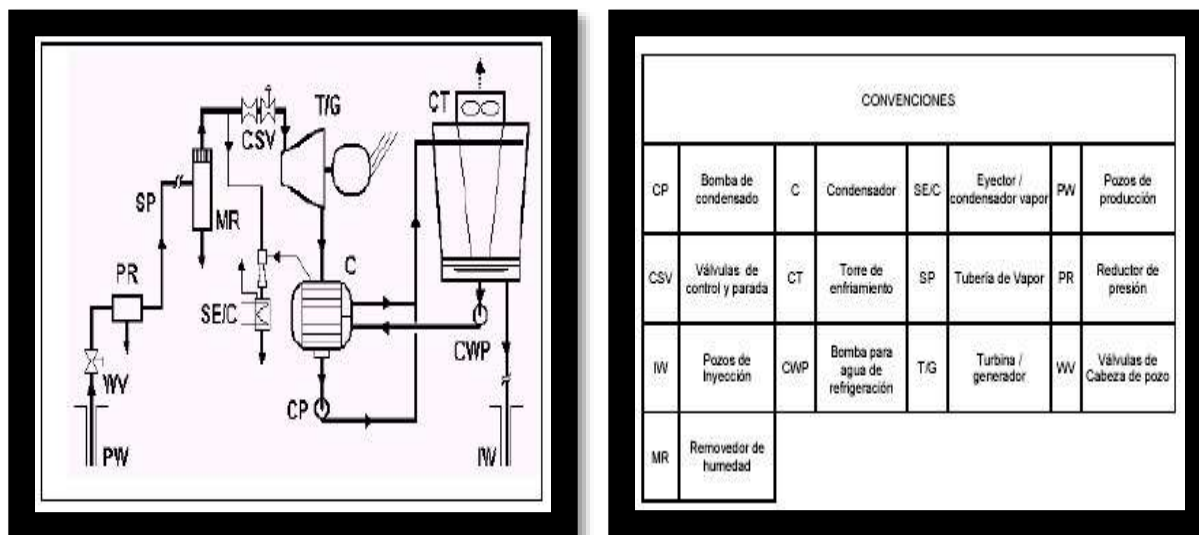


Figura 3.1 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UNA PLANTA TIPO VAPOR DIRECTO.

“Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”

La Figura 3.1 muestra un diagrama simplificado de las plantas tipo Direct-Steam. En el vapor geotérmico se encuentran gases no condensables (NCG), usualmente entre 2 al 10%, lo cual hace que sea necesario un sistema de extracción de gas, (componente

crítico de la planta). Usualmente, se utilizan eyectores de dos etapas, con condensadores tanto dentro como al final de los mismos., sin embargo en algunos casos es necesario colocar bombas de vacío o turbo compresores. Como se observa en la Figura 3.1 el sistema incluye un condensador de refrigeración. El vapor condensado no recircula a la caldera, tal como en una planta de generación convencional, este se utiliza para alimentar la torre de enfriamiento, el exceso de condensado típicamente de 10-20% de peso del vapor, es usualmente reinyectado al yacimiento. Las torres de enfriamiento de tiro mecánico, ya sea de flujo continuo o cruzado son las más usadas para sistemas de enfriamiento tipo húmedo, sin embargo, en algunas plantas se utilizan las torres de tiro natural.

En la actualidad las plantas tienen unos rangos de 20 a 60 MW por unidad, dichas unidades tienen un diseño modular para rápida instalación, el diseño flexible permite adaptarse a un amplio rango de condiciones de vapor.

b) Plantas tipo “Flash- Steam”

Los yacimientos de vapor seco, son poco frecuentes. Los más conocidos son aquellos donde predomina la fase líquida. En pozos artesianos, el fluido producido es una mezcla de las dos fases, líquido y vapor. La calidad de la mezcla es función de las condiciones del fluido en el yacimiento, las dimensiones del pozo, y la presión en la cabeza del pozo, la cual se controla mediante una válvula o por medio de una placa de orificio.

A pesar de que algunas máquinas experimentales han generado energía impulsadas por un fluido que cuenta con las dos fases (líquido y vapor), convencionalmente se separan las fases y solo se usa el vapor para impulsar la turbina, debido a que la presión en la cabeza del pozo es baja, típicamente entre 0.5-1 MPa, permiten una separación efectiva por la acción centrífuga. Los separadores centrífugos producen vapor con calidades superiores al 99.99%.

El líquido proveniente del separador puede ser reinyectado, usado para producir energía térmica por medio de intercambiadores de calor para gran variedad de aplicaciones directas. Las plantas en las que se utiliza vapor a alta presión para generar energía son las llamadas Single Flash y las que usan tanto el vapor a alta y a baja presión son denominadas Double Flash.

b.1) Plantas Tipo “Single Flash”

Un diagrama simplificado de una planta de este tipo se muestra en la Figura 3.2

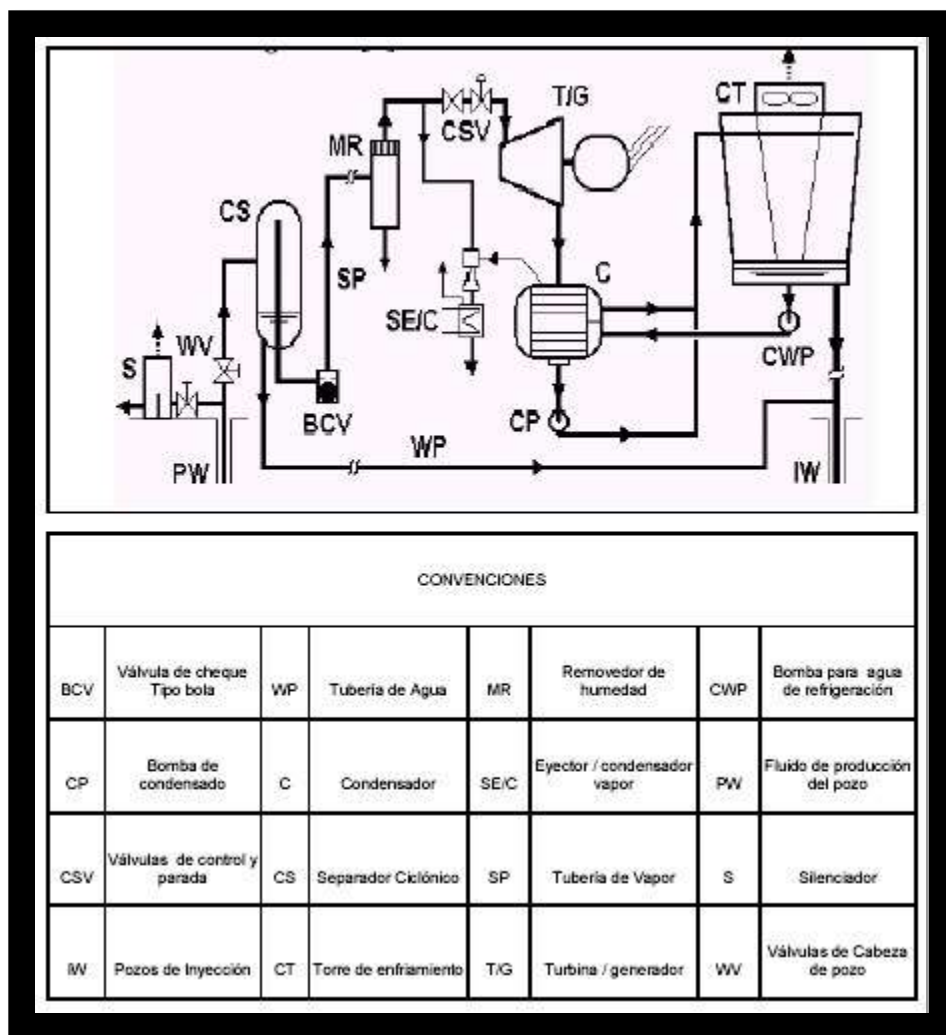


Figura 3.2 DIAGRAMA DE PLANTA TIPO SINGLE FLASH.

“Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión” [7]

El fluido con las dos fases proveniente del pozo es dirigido horizontal y tangencialmente en el separador ciclónico. El líquido tiende a fluir en forma circular por las paredes, mientras que el vapor sube y es removido por un tubo vertical. El diseño es muy simple ya que no tiene partes móviles y es conocido como separador de salida en el fondo. En ocasiones se utilizan baffles para mejorar la segregación de las dos fases, una válvula de bola provee seguridad ante la presencia de impurezas del líquido que pueda entrar en la línea de vapor. Las líneas de transmisión de vapor son esencialmente las mismas que las usadas en las plantas tipo Dry Steam .

El balance de la planta es prácticamente idéntico a las plantas tipo Direct Steam, la principal diferencia es la cantidad de líquido que debe ser manejado. Comparando plantas de 55MW, una planta típica Single Flash produce cerca de 630 kg/s de líquido sobrante, mientras que una planta Direct Steam produce 20 kg/s, una relación de 30 a 1, si todo este líquido es reinyectado la planta Single Flash podrá retornar al yacimiento

cerca del 85% de la masa producida, en comparación del 15 % de la planta tipo Direct-Steam.

b.2) Plantas Tipo “Double Flash”

Mediante esta tecnología se puede obtener entre un 20 a un 25% de potencia adicional a partir del mismo fluido geotérmico. El vapor de baja presión producido al estrangular el líquido a baja presión es enviado a una turbina de baja presión o a una etapa adecuada de la turbina principal (en el caso de una turbina de admisión dual).

Los principios de operación de este tipo de planta es similar a la planta tipo Single Flash, sin embargo es mucho más costosa debido a que requiere mayor equipamiento. La Figura 3.3 muestra un diagrama simplificado de este tipo de plantas.

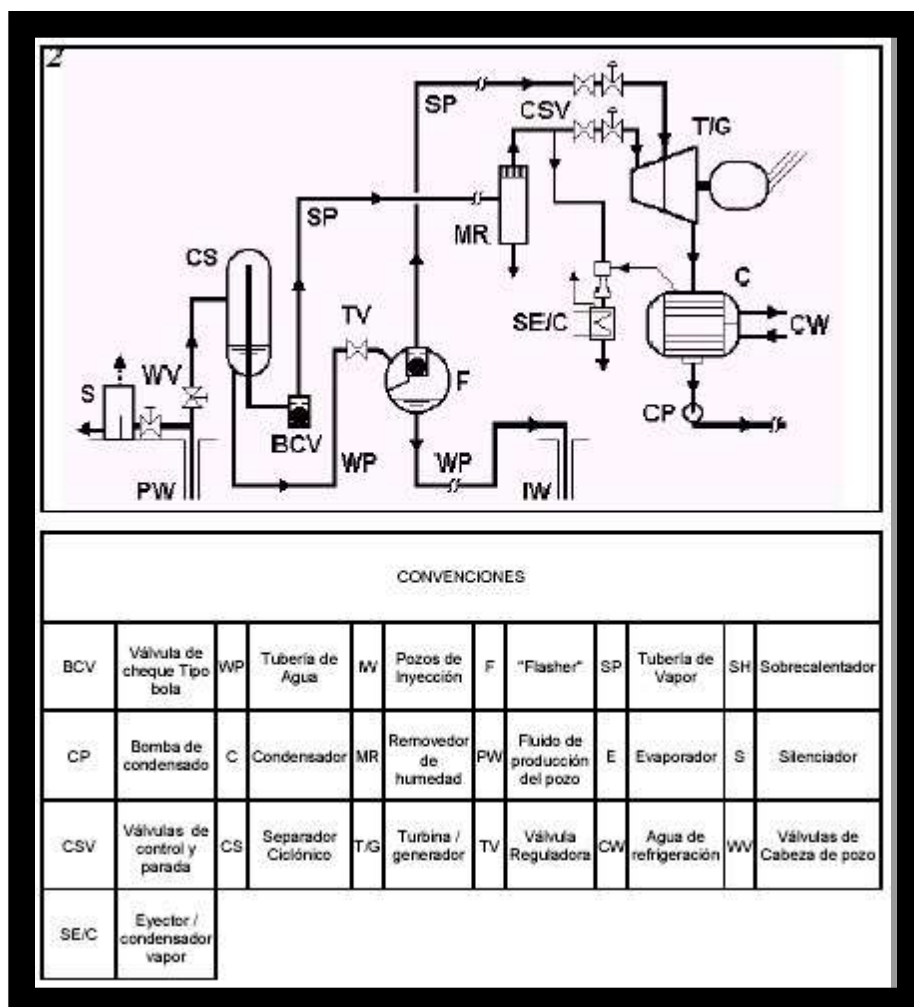


Figura 3.3 DIAGRAMA DE PLANTA TIPO DOUBLE FLASH.

“Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”

c) Plantas Tipo Binario (Binary Plants)

En una planta tipo Binario la energía térmica del geofluido se transfiere por medio de un intercambiador de calor a un fluido de trabajo secundario para uso en un ciclo convencional. El geofluido no está en contacto con las partes móviles de la planta, así mismo minimiza y en muchos casos elimina los efectos de la erosión, las plantas binarias tienen ventajas puesto que pueden manejar geofluidos de baja temperatura (menos de 150 °C), de alto contenido de gases disueltos y corrosivos (Figura 3.4).

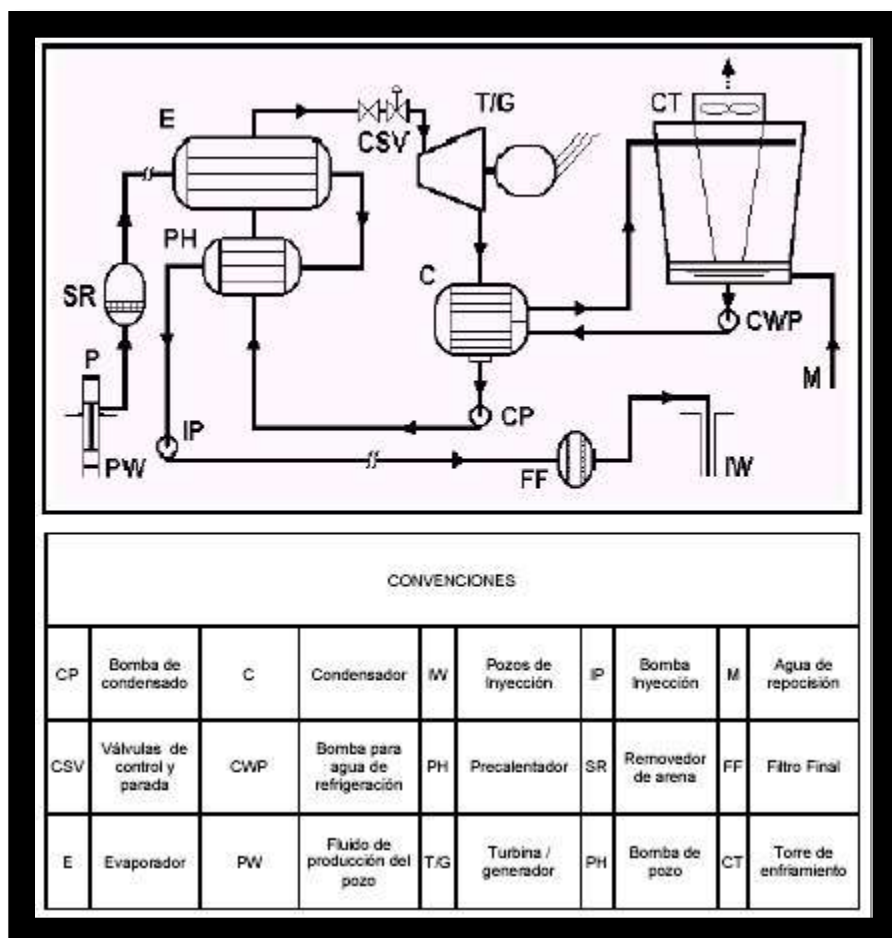


Figura 3.4 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE PLANTA TIPO BINARIO
 “Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”

Un diagrama de este tipo de planta se presenta en la Figura 3.4, el ciclo consiste en un precalentador, un evaporador, válvulas de control, el conjunto turbina generador, un condensador y una bomba de alimentación. Hidrocarburos tales como el isobutano, isopentano y propano son buenos candidatos para ser usados como fluidos de trabajo al igual que ciertos refrigerantes.

La Tabla 3.1 muestra los equipos más importantes que conforman los tipos de plantas geotérmicas.

Equipo	tipo de sistema			
	Dry steam	Single flash	Double Flash	Basic Binary
suministro vapor o salmuera				
Bombas	no	No (Pos)	No (Pos)	si
válvulas cabeza de pozo	si	Si	si	si
Silenciadores	si	Si	si	no
Desarenadoras	si	No	No	si
Tubería de vapor	si	Si	si	no
separadores ciclón de vapor	no	Si	si	no
tanques de almacenamiento	no	No	si	no
Tubería salmuera	no	Si	si	si
bomba auxiliar	no	Pos.	Pos.	Pos.
separador final humedad	si	Si	si	no
Intercambiador de Calor				
Evaporadores	no	No	No	si
Condensadores	si (no)	si (no)	si	si
Turbina-Generador y controles				
Turbina de vapor	si	Si	si	no
Turbina de vapor orgánica	no	No	no	si
Turbina de admisión dual	no	No	si	no
Sistema de control	si	Si	si	si
Bombas				
Condensador	si (No)	si (No)	si	si
Agua refrigeración	si (No)	si (No)	si	si
inyección salmuera	No	No (Pos)	si (no)	si
Sistema remoción gas no condensable				
Equipo	tipo de sistema			
Eyectores de vapor	si	Si	si	no
Compresores	Pos.	Pos.	Pos.	no
bombas de vacío	Pos.	Pos.	Pos.	no
Torres de enfriamiento				
tipo húmedo	si (No)	si (No)	si	Pos.
tipo seco	No	No	No	Pos.

Tabla 3.1 EQUIPOS PRINCIPALES EN PLANTAS GEOTÉRMICAS.
 “Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”

d) Plantas Combinadas o Híbridas

Como se ha mencionado los fluidos geotérmicos tienen un amplio rango de propiedades físicas tales como temperatura, presión, presencia de gases no condensables, sólidos disueltos, pH, potencial de corrosión, por tal razón una gran variedad de sistemas de conversión de energía han sido desarrollados para adaptarse a estas condiciones particulares. Los sistemas descritos anteriormente pueden ser combinados para lograr sistemas mucho más efectivos, en consecuencia se pueden diseñar los siguientes

tipos de plantas híbridas:

- ✓ Plantas direct-steam/ Binary
- ✓ Plantas single flash/ Binary
- ✓ Planta integrada Single y Doble Flash
- ✓ Sistema híbrido geotermia y fósil

3.1.2. Desempeño de las Plantas de Generación

Para medir el funcionamiento de los sistemas de energía se utiliza la segunda ley de la termodinámica como la base para dicha estimación. El concepto de trabajo o energía disponible es usado generalmente para este propósito, ya que las plantas geotérmicas no operan en un solo ciclo sino en una serie de procesos, la eficiencia del ciclo térmico (hth) para plantas convencionales no se aplica.

La eficiencia del ciclo térmico (hth) puede ser aplicada de forma significativa, a las plantas geotérmicas, en el caso de las plantas binarias. Sin embargo, la eficiencia térmica aun en este caso debe ser calculada solamente para evaluar el ciclo cerrado incluyendo el fluido de trabajo y no la operación global en la cual se tenga en cuenta el geofluido, desde los pozos productores hasta la salida de la planta.

La eficiencia de utilización (η_u), la cual mide la conversión de trabajo disponible, del recurso en trabajo útil. Para plantas geotérmicas se tiene que:

$$\eta_u = \frac{W}{\dot{m}.E}$$

η_u = Eficiencia de utilización de la planta geotérmica, sin unidades.

W= Potencia eléctrica entregada a la red, W.

m= Caudal másico total del fluido geotérmico, kg/s.

E = Energía específica del geofluido bajo condiciones en el yacimiento, J/kg.

$$E = h_{(P_1, T_1)} - h_{(P_0, T_0)} - T_0 (s_{(P_1, T_1)} - s_{(P_0, T_0)})$$

$h(P_1, T_1)$ = Entalpía específica en el llamado “estado estacionario”, J/kg.

$h(P_0, T_0)$ = Entalpía específica en las condiciones del lugar de la planta, J/kg.

T_0 = Temperatura de diseño en grados absolutos, K

$s(P_1, T_1)$ = Entropía específica en el llamado “estado estacionario”, J/kg-K.

$s(P_0, T_0)$ = Entropía específica en las condiciones del lugar de la planta, J/kg-K.

Las especificaciones principales y desempeños de plantas de generación del tipo Direct-Steam, Single y Double Flash están dados en la Tabla 3.2 y se presentan datos similares para pequeñas plantas binarias en la Tabla 3.3. El consumo específico de geofluido (SGC), es una medida del desempeño. Se observa un dramático incremento en este parámetro, cuando compara plantas binarias con las tipo steam, particularmente las de tipo directo (direct steam). Se puede observar que las plantas tipo directo operan a unas altas eficiencias, típicamente entre 50-70%.

Planta	Valle Secolo,Unidad2	Miravalles, Unidad 1	Beowawe
Localización	Larderello,Italia	Guanacaste, Costa Rica	Beowawe,Nevada
Año de inicio	1992	1994	1985
Tipo	Direct steam	Single flash	Double flash
Potencia,MW	57	55	16,7
Salida de potencia,MW-net	52,2	52	16
Caudal geotérmico,kg/s	111,1	759,5	157,5
Temperatura de la fuente°C	204	230	215
Turbina:			
Presió de entrada,kPa:primario	550,3	600	421,4
Secundario			93,1
Temperatura de entrada,°C:primario	200-210	159	146
Secundario			99
masa caudal/turbina,kg/s:primario	111,1	114	22,3
Secundario			12,2
Presión en el exhosto,mmHg	59,94	93,73	33,02
Alto de las aspas de la turbina,mm	Na	584	635
Velocidad,rpm	3.000	3.600	3.600
Condensador:			
Tipo	DC	DC	DC
Calor requerido,MWt	245	243	71,8
CW flujo,Kg/s	2.785	4.234	1.474

Sistema NCG:			
Eyector de vapor	No	Si	si
Etapas		2	1
Flujo de vapor,Kg/s		4,06	na
Compresor	Si	Si	no
Etapas	2	4	
Potencia,MW	1,4	0,4	
Bomba de vacio	No	No	si
Desempeño de la planta			
SGC-net,kg/MWh	7.666	52.572	35.437
N,%,total	62,9	31,2	48,7
Net	57,6	29,5	46,7

Tabla 3.2 ESPECIFICACIONES DE PLANTAS GEOTÉRMICAS
 “Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”

	Second Imperial Geothermal Co.	Mammoth-Pacific. Unidad1	Amedee
Localización	Heber,CA	Mammoth,CA	Wendel,CA
Año de inicio	1993	1985	1988
Tipo	presion dual	basico	Basico
N° de unidades	12	2	2
Potencia, MW	40	10	2
Potencia de salida, MW-net	32	7	1,6
Potencia neta/unidad, MW	2,7	3,5	0,8
Caudal geotermico, kg/s	999	220,5	205,1
Temperatura de la fuente, °C	168	169	103
Bombas bajas	Si	si	Si
Fluido de trabajo	isopentano C5H12	isobutano C4H10	R-114,C2Cl2F4
Evaporador(s)			
N° por unidad	2	6	1
Tipo	tubular liso	tubular liso	tubular liso
Calor requerido, MWt	413.2(e)	86,75	28,72
Temperatura del fluido °C:			
Entrada	168	169	104
Salida	71(e)	66-88	71
Turbina:			
Tipo	flujo axial	flujo radial	flujo axial
Temperatura de salida, °C	na	138	83
Presión, kPa: entrada	na	3.379	993
Salida	na	variable	276
Masa caudal/turbina, kg/s	na	92	100,8
Velocidad, rpm	1.800	11.050	3.600
Condensador(s):			
N° por unidad	2	11	1
Tipo	tubular liso	tubular canales	Evaporador
Calor requerido, MWt	269,2	79,72	Na
Refrigerante	agua	aire	Agua
Temperatura refrigerante, °C:			
Entrada	20	variable	21,1
Salida	28,1	variable	Na
Desempeño de la planta:			
SGC-net, kg/MWh	85.049	113.399	462.669
Un, %, Total	44,5	32,4	17,4
Neto	35,6	22,7	13,9
N, %: total	14	11,5	7
Neto	13,2	8,1	5,6

Tabla 2.7 ESPECIFICACIONES DE PLANTAS GEOTÉRMICAS BINARIAS
“Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE LA PLANTA

El diseño consiste en el cálculo del ciclo termodinámico para luego realizar la selección de los componentes de la planta geotérmica de generación eléctrica con ciclo combinado. Este tipo de planta se eligió para lograr un uso más efectivo de los recursos geotérmicos debido a que los fluidos tienen un amplio rango de propiedades físicas tales como temperatura, presión, presencia de gases no condensables, sólidos disueltos, pH, potencial de corrosión. Este sistema de conversión de energía se puede adaptar a estas condiciones particulares.

La planta con ciclo combinado (Single Flash / Binary) utiliza el vapor del fluido geotérmico obtenido del separador para usarlo en la primera etapa de la turbina, luego se aprovecha el líquido geotérmico sobrante calentándolo en intercambiadores de calor para emplear el vapor generado en la segunda etapa de la turbina y obtener energía eléctrica en el generador. La tabla 4.1 muestra una descripción de la planta.

SISTEMA	SUBSISTEMAS	COMPONENTES
PLANTA GEOTÉRMICA DE CICLO COMBINADO	Producción del Fluido Geotérmico	Válvula de cabeza de pozo, silenciador, tuberías y uniones
	Extracción de vapor	Separador ciclónico, válvula de cheque tipo bola, tubería de vapor, removedor de humedad
	Calentamiento del líquido saturado	Pre calentador, evaporador, tubería de agua
	Generación Eléctrica	Turbina de dos etapas, generador eléctrico, válvula de control y parada
	Condensación y torre de enfriamiento	Condensador, bomba de condensado, torre de enfriamiento tipo húmedo, bomba de agua de refrigeración, tuberías y uniones
	Reinyección del Fluido Geotérmico	Bomba de inyección, compresor de gases no condensables, eyectores de vapor, válvula de inyección, tuberías y uniones

Tabla 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA GEOTÉRMICA

4.1. Consideraciones Preliminares

Para el diseño de la planta geotérmica se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

4.1.1. Consideraciones Mecánicas

- Tuberías aisladas térmicamente de alta resistencia de material anticorrosivo con un revestimiento de cromo.

- Válvulas reguladoras, de expansión, de derivación, de seguridad y otras.
- Silenciadores para la purga de fluidos residuales y evitar los ruidos estridentes.
- Presencia de gases no condensables y sólidos disueltos.
- Potencial de corrosión.
- Esfuerzos mecánicos.

4.1.2. Consideraciones Fluido-termodinámicas

- El fluido geotérmico producido es una mezcla de las dos fases, líquido y vapor, ya que los fluidos hidrotermales de este tipo son los más comunes.
- El ciclo termodinámico es el de una planta combinada o híbrida entre las tipo Single Flash y Binary Plants con el que se logra un sistema más efectivo.
- El fluido de trabajo secundario usado en los intercambiadores de calor es el isopentano, debido a que tiene un punto de ebullición inferior al del agua.
- El fluido usado como refrigerante es el agua almacenada en la torre de enfriamiento que se requiere para el condensador. (Cordoba, 2007)

4.2. Cálculos

En la Figura 4.5 se observa el esquema de la planta geotérmica de generación eléctrica con ciclo combinado (Single Flash / Binary), con una turbina de dos etapas y una potencia instalada de 50 MW,

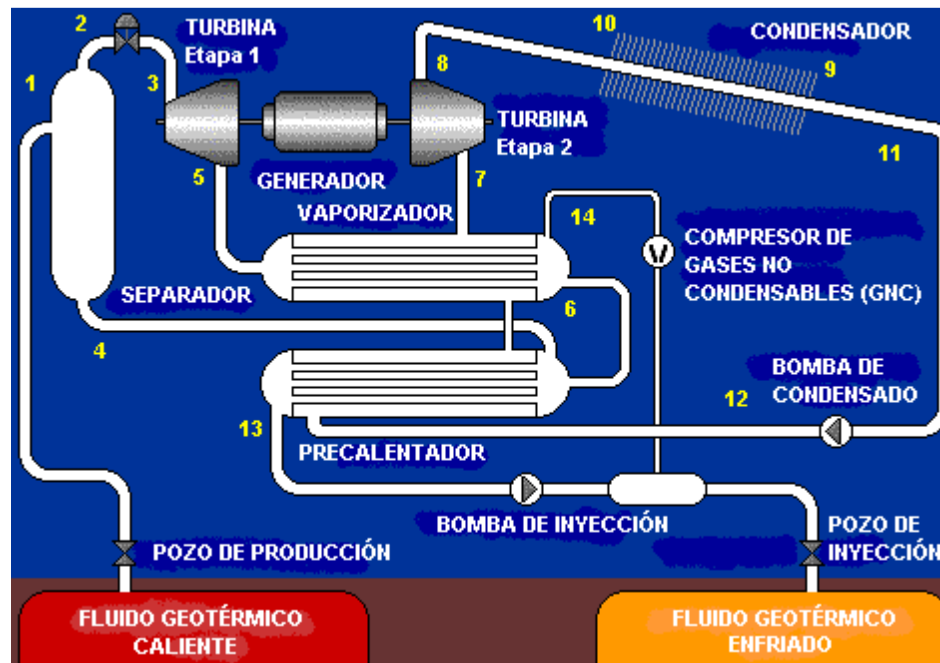


Figura 4.5 ESQUEMA DE LA PLANTA GEOTÉRMICA DE 50 MW
 “The Basics of Geothermal Power Conversion”

a) Parámetros del Separador

Para el cálculo, al menos dos parámetros del fluido deben ser conocidos. Se asume que la entalpía y la presión del flujo geotérmico son conocidas. Con estos parámetros todos los otros parámetros tales como la entropía y la temperatura pueden ser determinados. El fluido geotérmico es separado en vapor y líquido porque solo el vapor ingresaría a la turbina.

La calidad del fluido puede ser calculada y luego el flujo de masa de las dos fases por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_2 = x_1 \cdot \dot{m}_1$$

$$\dot{m}_4 = (1 - x_1) \cdot \dot{m}_1$$

Los números se refieren a los de la Figura 3.5 y las variables fueron definidas en la nomenclatura general. Del equilibrio térmico se obtiene:

$$x_1 = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_4}$$

Las temperaturas del vapor y del líquido son iguales a la del fluido geotérmico que ingresa al separador, es decir:

$$T_2 = T_1 = T_4$$

Las presiones del vapor y del líquido son también iguales a la del fluido geotérmico que entra al separador, es decir:

$$P_2 = P_1 = P_4$$

La entalpía del vapor es determinada como la entalpía del vapor saturado con la presión P_2 . Igualmente, la entalpía del líquido como la del líquido saturado con la presión P_4 . Las entropías del vapor y del líquido pueden ser calculadas con la temperatura y la entalpía, igual que todos los parámetros del fluido en el separador.

b) Parámetros de la Válvula de regulación

Esta válvula produce pérdidas debido al estrangulamiento del vapor antes de ingresar a la turbina. Debido al estrangulamiento, la presión de vapor cae de P_2 a P_3 , obteniendo una relación de expansión en la válvula (Re_{x_v}), es decir:

$$P_3 = \frac{P_2}{Re_{x_v}}$$

El fluido como vapor saturado es expandido isoentálpicamente en la válvula de regulación, es decir:

$$h_3 = h_2$$

Con la presión y la entalpía se pueden calcular todos los demás parámetros, el flujo de masa se mantiene igual, es decir:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2$$

c) Parámetros de la Turbina Etapa 1

Idealmente, la entropía del fluido después de la turbina es igual a la entropía del fluido antes del ingreso a la turbina, es decir:

$$s_{5i} = s_3$$

Con una presión fijada después de la turbina y s_{5i} conocido, la entalpía ideal del fluido después de la turbina puede ser calculada, luego se corrige la entalpía considerando una eficiencia adiabática, es decir:

$$\eta_{at} = \frac{h_3 - h_{5r}}{h_3 - h_{5i}}$$

$$h_{5r} = h_3 - \eta_{at}(h_3 - h_{5i})$$

El flujo de masa después de la turbina es igual al flujo de masa antes de la turbina, es decir:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3$$

Después de la turbina, con la entalpía y la presión del fluido conocidas, la temperatura puede ser calculada.

La potencia que entrega la turbina en su primera etapa es calculada como:

$$W_{t_1} = (h_3 - h_{5r}) \cdot \dot{m}_3 \cdot \eta_t$$

d) Parámetros de la Bomba de Condensado

Si la presión antes de la bomba es conocida, los otros parámetros pueden ser determinados, porque la calidad del isopentano sería cero ($x_{11} = 0$). Con estos dos parámetros, los otros parámetros antes de la bomba son calculados.

La bomba de condensado eleva la presión del isopentano para su ingreso al precalentador. Conociendo la relación de expansión de la bomba (R_{exb}) se obtiene la presión después de la bomba.

$$P_{12} = R \cdot x_b \cdot P_{11}$$

Idealmente, la entropía del fluido antes y después de la bomba son iguales.

$$s_{12i} = s_{11}$$

Con la entropía y la presión conocidas se puede calcular la entalpía ideal del fluido después de la bomba, luego se corrige la entalpía considerando una eficiencia adiabática.

$$\eta_{ab} = \frac{h_{12i} - h_{11}}{h_{12r} - h_{11}}$$

$$h_{12r} = h_{11} + \frac{(h_{12i} - h_{11})}{\eta_{ab}}$$

Con la presión y la entalpía se pueden calcular los otros parámetros después de la bomba. El flujo de masa antes y después de la bomba de condensado es el mismo.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$$

La potencia que realiza la bomba de condensado es calculada como:

$$W_b = \frac{\dot{m}_{11} \cdot v_{11} (P_{12} - P_{11})}{\eta_b}$$

e) Parámetros del Precalentador

La entalpía del fluido geotérmico antes del precalentador (h_4) y la entalpía del isopentano después de la bomba (h_{12r}) son conocidas. Después del precalentador, la calidad del isopentano es igual a uno ($x_6 = 1$) y la presión es igual a la de la salida de la bomba, es decir:

$$P_6 = P_{12}$$

Por lo tanto, todos los parámetros del isopentano después del precalentador pueden ser calculados. Usando la ecuación de balance de calor, la entalpía del fluido geotérmico a reinyectar puede ser calculada como:

$$h_{13} = \frac{h_4 \cdot \dot{m}_4 - (h_6 - h_{12r}) \cdot \dot{m}_{12}}{\dot{m}_4}$$

La presión del fluido geotérmico antes y después del precalentador son casi las mismas. Conocida la pérdida de presión (ΔP_p), se calcula la presión del fluido a reinyectar.

$$P_{13} = P_4 - \Delta P_p$$

Con la presión y la entalpía, todos los parámetros de fluido geotérmico a reinyectar pueden ser calculados. La transferencia de calor del fluido geotérmico al isopentano pueden entonces ser calculados.

$$\dot{q}_{hp} = \dot{m}_4 (h_4 - h_{13})$$

$$\dot{q}_{cp} = \dot{m}_{12} (h_6 - h_{12r})$$

f) Parámetros del Vaporizador

La entalpía del fluido geotérmico antes del vaporizador (h_{5r}) y la entalpía del isopentano después del precalentador (h_6) son conocidas. La temperatura de sobrecalentamiento es conocida (T_7) y la presión es igual a la de la salida del precalentador, es decir:

$$P_7 = P_6$$

Por lo tanto, todos los parámetros del fluido de trabajo después del vaporizador pueden ser calculados. Usando la ecuación de balance de calor, la entalpía del fluido geotérmico a reinyectar puede ser calculada.

$$h_{14} = \frac{h_{5r} \cdot \dot{m}_5 - (h_7 - h_6) \cdot \dot{m}_6}{\dot{m}_5}$$

La presión del fluido geotérmico antes y después del vaporizador son casi las mismas. Conocida la pérdida de presión (ΔP_v), se calcula la presión del fluido a reinyectar.

$$P_{14} = P_5 - \Delta P_v$$

Con la presión y la entalpía, todos los parámetros de fluido geotérmico a reinyectar pueden ser calculados.

La transferencia de calor del fluido geotérmico al isopentano pueden entonces ser calculados.

$$\dot{q}_{hv} = \dot{m}_5 (h_{5r} - h_{14})$$

$$\dot{q}_{cv} = \dot{m}_6 (h_7 - h_6)$$

g) Parámetros de la Turbina Etapa 2

Idealmente, la entropía del fluido después de la turbina es igual a la entropía del fluido antes del ingreso a la turbina, es decir:

$$s_{8i} = s_7$$

Con una presión fijada después de la turbina y s_{8i} conocido, la entalpía ideal del fluido después de la turbina puede ser calculada, luego se corrige la entalpía considerando una eficiencia adiabática, es decir:

$$\eta_{at} = \frac{h_7 - h_{8r}}{h_7 - h_{8i}}$$

$$h_{8r} = h_7 - \eta_{at} (h_7 - h_{8i})$$

El flujo de masa después de la turbina es igual al flujo de masa antes de la turbina, es decir:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7$$

Después de la turbina, con la entropía y la presión del fluido conocidas, la temperatura puede ser calculada.

La potencia que entrega la turbina en su segunda etapa es calculada como:

$$\dot{W}t_2 = (h_7 - h_{8r}) \cdot \dot{m}_7 \cdot \eta_t$$

h) Parámetros del Condensador

La pérdida de presión del agua refrigerante en el condensador no es alta. Se representa con ΔP_c , entonces:

$$P_{10} = P_9 - \Delta P_c$$

Los flujos de masa para los dos fluidos son constantes, es decir:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}, \quad \dot{m}_8 = \dot{m}_{11}$$

Para calcular los parámetros del agua refrigerante a la salida del condensador se debe calcular la entalpía. Esta puede ser determinada de la ecuación de balance de calor, obteniendo:

$$h_{10} = \frac{\dot{m}_9 \cdot h_9 + \dot{m}_8 (h_{8r} - h_{11})}{\dot{m}_9}$$

i) Cálculos de los flujos de masa

La potencia eléctrica de la planta queda definida de la siguiente forma:

$$We = We_1 + We_2$$

$We_1 =$ Potencia eléctrica generada en la primera etapa de la turbina, kW.

Potencia eléctrica generada en la segunda etapa de la turbina, kW.

$We_2 =$

Se puede obtener el flujo de masa del fluido geotérmico requerido para generar la potencia eléctrica en la primera etapa de la turbina de la siguiente manera:

$$We_1 = Wt_1 \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$We_1 = (h_3 - h_{5r}) \cdot \dot{m}_3 \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 = x_1 \cdot \dot{m}_1 = \left(\frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_4} \right) \cdot \dot{m}_1$$

$$\dot{m}_1 = \frac{We_1 (h_2 - h_4)}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g (h_1 - h_4) (h_3 - h_{5r})}$$

Igualmente se obtiene el flujo de masa del isopentano requerido para generar la potencia eléctrica en la segunda etapa de la turbina, de la siguiente manera:

$$We_2 = Wt_2 \cdot \eta_m \cdot \eta_g = (h_7 - h_{8r}) \cdot \dot{m}_7 \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$\dot{m}_7 = \frac{We_2}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g (h_7 - h_{8r})}$$

j) Cálculo del diámetro de tuberías

El diámetro de las tuberías para el transporte del fluido geotérmico se calcula mediante la siguiente la fórmula empírica:

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{m}h^{1.102}}{K\pi P_C^{0.96}}}$$

D = Diámetro de la tubería, m.

m = Flujo de masa, kg/s.

h = Entalpía del fluido, kJ/kg.

K = 1839000, sin unidades.

PC = Presión crítica (bar).

k) Cálculo de la eficiencia de la planta

La eficiencia de la planta geotérmica de ciclo combinado se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\eta_p = \frac{We}{\dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_7 \cdot h_7}$$

Para comprobar la mejora de la eficiencia de las plantas de ciclo combinado, se puede comparar con las eficiencias de las plantas tipo Single Flash y Binary Plants, que se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\eta_{SF} = \frac{We_1}{\dot{m}_3 \cdot h_3} \qquad \eta_{BP} = \frac{We_2}{\dot{m}_7 \cdot h_7}$$

η_P = Eficiencia de la planta de ciclo combinado (Single Flash / Binary), sin unidades.

η_{SF} = Eficiencia de la planta tipo Single Flash, sin unidades.

η_{BP} = Eficiencia de la planta tipo Binary Plants, sin unidades. (Cordoba, 2007)

CAPÍTULO 5

Estudio económico y ambiental

5.1 Económico

La determinación de costos de la generación geotérmica no resulta sencillo si no se disponen de datos propios, es decir, si no se cuenta con experiencias a escala a nivel nacional, puesto que en la mayoría de los casos las instalaciones son de tipo “personalizado” y adaptadas a las posibilidades técnico económicas del lugar.

Si se requiriesen datos más significativos resultaría necesario efectuar los estudios en forma local, para lo cual se debe contar con los medios correspondientes.

La primera de las dificultades consiste en la determinación de la factibilidad de los recursos disponibles, uno de cuyos factores determinantes es su accesibilidad y otro la certeza de con la que se lo determina. Ello se puede sintetizar en el siguiente tabla 5.1 se aprecia el cuadro de variación del grado de accesibilidad con la profundidad del recurso y la factibilidad de la explotación relacionada con el grado de certeza de la existencia y ubicación del recurso:

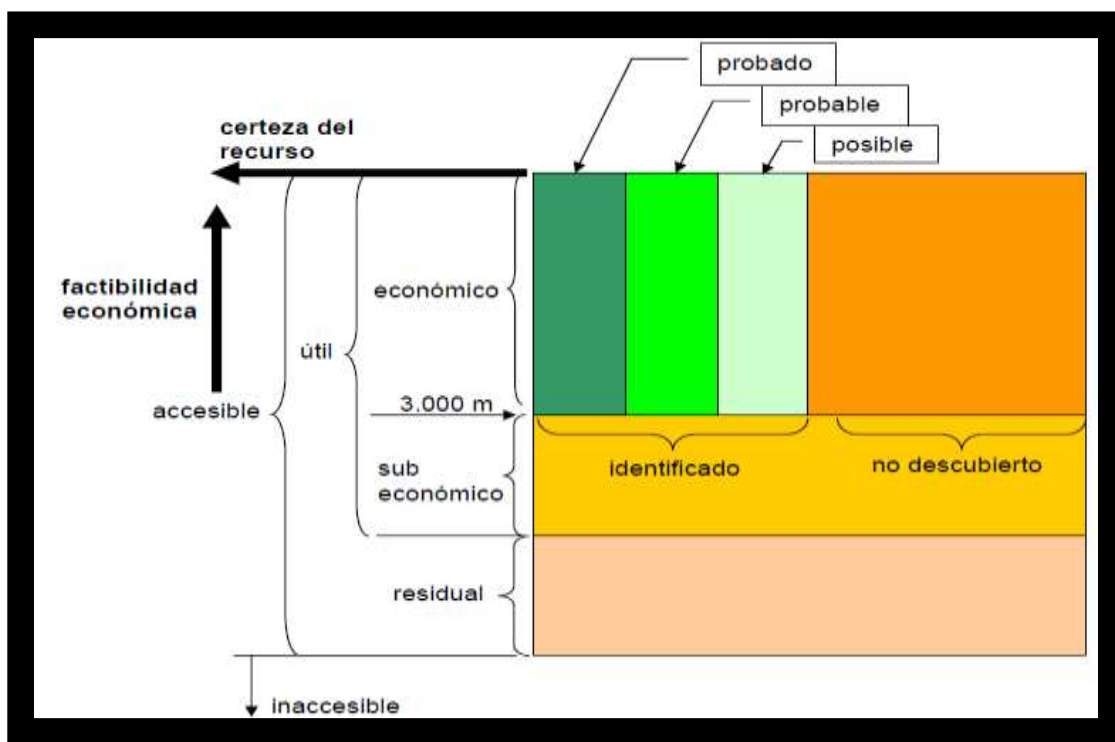


Tabla 5.1 Cuadro de variación grado accesibilidad/profundidad del recurso y factibilidad/grado de certeza.

“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

A los fines de una primera aproximación se pueden analizar algunos resultados que se han publicado en distintos medios y en Internet, sobre la base de estudios efectuados en otros países interesados en el desarrollo del recurso.

El análisis efectuado para este caso rescata la información más relevante de un estudio realizado por la Universidad de Chile y presentado a la CNE, con el objeto de evaluar el proyecto de generación geotérmica Calabozo. Cabe destacar que el estudio antes mencionado se realizó a modo de prueba para una potencia instalada de 50 MW.

A continuación se muestran los datos relevantes rescatados:

Toneladas CO2 desplazadas por año 125.000

Rentabilidad Sin Bono 9,20%

Inversión US\$ 86.000.000

Potencia Instalada [KW] 50.000

[US\$ / Kw] 1.722

Terreno ocupado por Planta Eléctricas: (en hectáreas por megavatio) tabla 5.2. Debe entenderse que este dato puede resultar relevante para un país con territorio reducido y escarpado como Chile, pero en el caso del nuestro, su importancia es menos que relativa.

Geotermia	0.1-0.3
Turbina de gas Natural	0.3-0.8*
Carbón Ciclo de vapor	0.8-8.0**
Hidroeléctrico	2.4-1000

*No incluye los gaseoductos

Tabla 5.2 Terreno ocupado por tipo de plantas eléctricas.
“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

Asimismo, se consignaron aspectos significativos a tener en cuenta en ese caso y que pueden servir de base para futuros análisis en el país:

5.1.1 Aspectos económicos y riesgos asociados:

A pesar de que el costo variable de operación de una central geotérmica es muy bajo, la perforación y terminación de un pozo representan entre el 30 y 50 % del costo de inversión del proyecto y resulta ser mucho mayor que los costos de inversión para las centrales convencionales, por lo tanto para competir con las tecnologías actuales de generación es necesario reducir estos costos mediante la ayuda financiera del gobierno a los inversionista privados, dándole una tasa de interés preferencial.

Economías de escala:

Las economías de escala podrían reducir significativamente los costos de algunos componentes. Se estima que el costo de capital (incluyendo el costo de taladrado) de plantas geotérmicas con capacidad desde 50MW a 150MW decrecen exponencialmente de acuerdo a la siguiente relación:

$$CC = 2500e^{-0.0025(P-5)} \text{ Miles de Dólares}$$

En donde CC representa el costo del capital y P es la potencia del proyecto. Para P = 50 MW el costo de capital es CC = 2797.68 Miles de Dólares y para P = 150 MW CC = 3592.29 Miles de Dólares.

Factores que influyen en el costo de una planta geotérmica:

Entre los más importante se encuentran:

- ✓ Temperatura y profundidad del recurso
- ✓ Tipo de recurso (vapor, líquido)
- ✓ Química del fluido geotérmico
- ✓ Permeabilidad del recurso
- ✓ El tamaño de la planta a ser construida. En este tipo de centrales existen economías de escala importantes. Es decir, a mayores tamaños de centrales geotérmicas menores costos medios de producción de energía.
- ✓ EL tipo de tecnología de la planta.
- ✓ Infraestructura.
- ✓ Condiciones climáticas del sitio
- ✓ Topografía del sitio
- ✓ Restricciones medioambientales y estudios
- ✓ Cercanía a las líneas de transmisión
- ✓ Costos indirectos como: administrativos, permisos, financiamiento, impuestos, etc. A manera de ejemplo, se cita que los costos indirectos para una planta geotérmica en países subdesarrollados están alrededor del 30% del costo total e incluso pueden llegar a ser más altos.

Otros valores comparativos que se pueden encontrar en las publicaciones son los relativos al costo del vector energético primario, vapor o agua caliente, en función del tipo de yacimiento disponible en cuanto a la entalpía de los fluidos geotérmicos tabla 5.3, y que de la misma forma que con los valores que se publican, tienen solamente el valor de mostrar las diferencias relativas:

	Costo US\$ / T de vapor	Costo ¢US / T de Agua caliente
Temperatura Alta (> 150°C)	3.5 – 6.0	20 - 40
Temperatura Media (100-150 °C)	3.0 - 4.5	20 - 40
Temperatura Baja (<100°C)	3.0 - 4.5	20 - 40

Tabla 5.3 Comparacion costos Vapor/agua caliente.
“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

Fórmula empírica para encontrar el costo de taladrado de un pozo:

Costo Taladrado (en US\$) = 240,785 + 210 x (pies de profundidad) + 0.019069 x (pies de profundidad)² (Geothermal Energy Association).

Las publicaciones actuales proporcionan datos en cuanto a estimación de costos por unidad de energía generada para los distintos tipos de yacimientos en cuanto a calidad, y escalas de generación, los cuales, aunque puedan diferir de los valores reales actuales tabla 5.4, sirven como comparación relativa:

	Costo unitario (¢US /kW-h) Yacimiento de alta calidad	Costo unitario (¢US /kW-h) Yacimiento de media calidad	Costo unitario (¢US /kW-h) Yacimiento de baja calidad
Pequeñas Plantas (<5 MW)	5.0 -7.0	5.5 - 8.5	6.0 -10.5

Plantas Medianas (5- 30 MW)	4.0 - 6.0	4.5 - 7	No recomendable
Plantas Grandes (>30 MW)	2.5 - 5.0	4.0 - 6.0	No recomendable

Tabla 5.4 Estimación costos calidad /escalas de generación.
“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

En función del tipo de recurso y escala de utilización:

Tamaño de la planta	Recurso de alta calidad	Recurso de media calidad
Plantas pequeñas (<5 MW)	Exploración : US\$ 400 - 800 Campo de Vapor: US\$ 100 - 200 Planta Geotermica.: US\$1100 - 1300 Total: US\$ 1800 - 2300	Exploración: US\$400 -1000 Campo de Vapor:US\$300 - 600 Planta Geotermica : US\$1100 - 1400 Total: US\$1800 - 3000
Plantas medianas (5-30 MW)	Exploración: US\$250 - 400 Campo de Vapor:US\$200 - 500 Planta Geotermica: US\$850 - 1200 Total: US\$1300 - 2100	Exploración: : US\$250 - 600 Campo de Vapor:US\$400-700 Planta Geotermica: US\$950 - 1200 Total: US\$1600 - 2500
Plantas grandes (>30 MW)	Exploración.: US\$100 - 200 Campo de Vapor: US\$300 - 450 Planta Geotermica: US\$750 - 1100 Total: US\$1150 - 1750	Exploración: US\$100 - 400 Campo de Vapor:US\$400 - 700 Planta Geotermica:US\$850 - 1100 Total: US\$1350 - 2200

Tabla 5.5 Estimación en función recurso y escala de utilización.
“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

En función de lo anterior, y tomando los promedios en cada caso, de acuerdo a los datos que se publican en la WEB se puede entonces efectuar una comparación de costos entre la generación geotérmica y los otras formas más convencionales de generación, sobre la base de tamaños o escalas similares.

Para ello se consideran algunos de los rubros principales en la formación de los costos respectivos, los cuales en algunos casos, son solamente de aplicación o con incidencia en los casos de generación geotérmica.

Estos valores se pueden resumir en el siguiente cuadro comparativo tabla 5.5:

Costos	Tipo de central			
	Geotérmica a vapor	Geotérmica binaria	Térmica a carbón	Ciclo combinado a gas natural
Costos de exploración y excavación US\$/kW	700	500	0	0
Costo unitario de inversión US\$/kW	800	1600	1225	638
Costos operacionales US\$/kW-año	100	100	183,1	231,8
Vida útil años	20	20	30	25

Tabla 5.6 Comparación costos /tipo de central.
“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

El costo de capital para construir una planta tipo flash de 20 MW a 50 MW en el mercado actual varía desde 2100 USD / KW a 2600 USD / KW. El costo de capital de desarrollo de plantas Binarias de 10 a 30 MW varía desde 3000 USD / KW a 3300 USD / KW” (www.energy.ca.gov/reports/2004-06-08 700-04-006.pdf)

Otras soluciones:

En general se tiende a considerar un recurso de alta entalpía como susceptible de explotación integral, de acuerdo a las necesidades y posibilidades del lugar, como se muestra por ejemplo en el siguiente esquema, donde se puede apreciar una típica instalación “en cascada”:

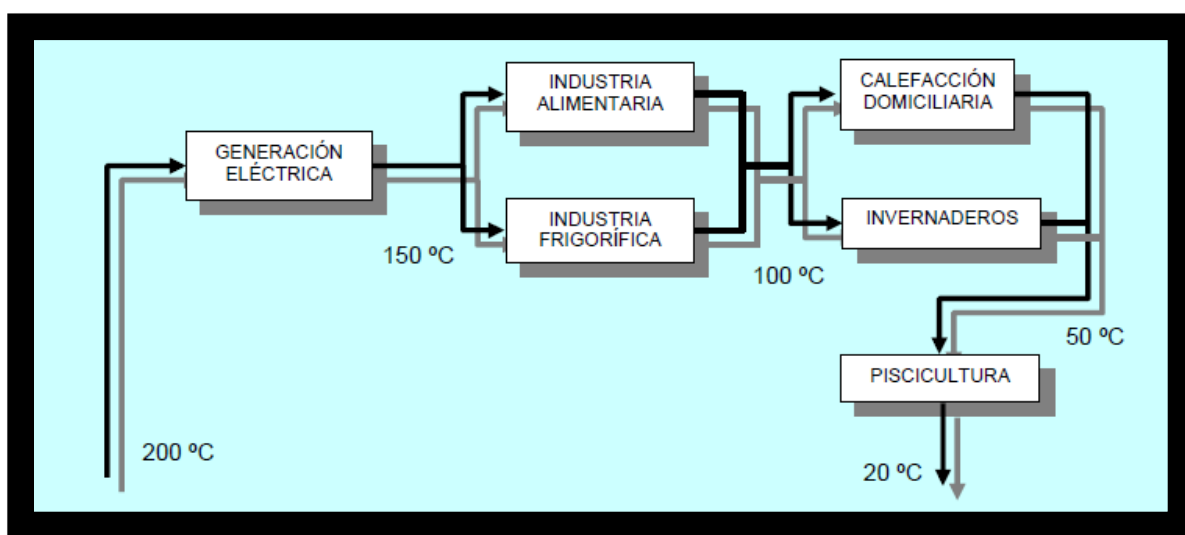


Tabla 5.6 típica instalación en cascada.

“Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”

5.2 Ambiental

La energía geotérmica es una energía renovable limpia y verde. El planeta tierra ha emitido calor desde su núcleo desde hace 4,5 millones de años y de momento no muestra señales de decaer.

Existe una planta geotérmica en Italia en activo desde 1913, demostrando la sostenibilidad de este recurso. Sin embargo, cuando puede ocurrir que los acuíferos se vean afectados por la escasez de precipitaciones y que tengan que ser rellenados artificialmente para su aprovechamiento como centrales geotérmicas.

Las centrales geotérmicas no producen apenas contaminación de efecto invernadero y emiten pocos contaminantes, normalmente ninguno. Y a diferencia de la energía solar o eólica, es un recurso que está disponible permanentemente. (Energiasrenovables.com)

5.2.1 Emisiones contaminantes de una planta de energía geotérmica.

Según el documento de impacto ambiental "proyecto de reconversión en San Jacinto Tizate para la generación de 72MW de energía eléctrica". Se demostró los principales cambios esperados tanto positivos como negativos. Con base a este análisis se pudo apreciar que sin el proyecto se daría lugar a 24 cambios (impactos) negativos significativos, entre los principales: dependencia de hidrocarburos, uso de tecnologías menos eficientes, desgaste del recurso geotérmico, presión sobre los recursos naturales, especialmente el bosque, migración de pobladores.

En lo general, los principales cambios positivos del proyecto son:

- ✓ Una independencia para el país en el uso de combustibles fósiles importados;
- ✓ Beneficios económicos provenientes de los créditos de carbono por reducción de las emisiones de gases provenientes del proceso de combustión de los hidrocarburos;
- ✓ Una alianza estratégica tanto con la comunidad aledaña , como con las instituciones del gobierno;
- ✓ La ejecución del proyecto aportara al desarrollo organizativo y económico local aportando a la reducción de la migración de pobladores por la generación de algunos empleos permanentes y temporales, así como brindándoles los servicios de salud, además de aportarle a la escuela los servicios de agua potable.

Con estos resultados se concluyo en lo siguiente:

"Con base en lo anterior se concluye que la ejecución del proyecto genera más beneficios que perjuicios y estos son controlables y mitigables por lo que se considera que es ambientalmente viable. " (IADB.ORG)

Conclusión

- Técnica y económicamente es viable la construcción de la planta geotérmica.
- La eficiencia energética de la planta de ciclo combinado aumenta en comparación al de la planta tipo Single Flash, debido al mejor aprovechamiento del fluido geotérmico.
- La eficiencia de la planta tipo Binary Plants es mayor porque se trata de un ciclo termodinámico cerrado, en los otros tipos de planta existe un fluido geotermal residual.
- La evaluación económica indica que por lo menos la planta geotérmica debe despachar a partir de media punta para hacer atractiva la inversión en este tipo de energías alternativas por la inversión privada internacional.
- El impacto ambiental que producen los recursos geotermales usados en la generación de energía eléctrica son mínimos comparados principalmente con los combustibles fósiles. Las más nuevas plantas geotérmicas emiten únicas 0.3 libras de CO₂ por el MW-h, y las emisiones de dióxido de sulfuro y óxido de nitrógeno son también mínimas.
- Uno de los puntos más fuerte de las plantas de generación eléctrica con recursos geotérmicos es el poder acceder a regiones remotas donde económicamente no es viable transportar la energía, descentralizando el consumo de la misma.
- Es importante incrementar la matriz energética con recursos no convencionales para disminuir nuestra dependencia de los combustibles fósiles.
- Las plantas geotérmicas son flexibles ya que pueden fácilmente expandirse para aumentar la demanda de electricidad.
- En la actualidad la energía geotérmica se encuentra despertando nuevamente en la curiosidad técnico-científica internacional, ya que anteriormente no se le prestó mucha importancia desde la primera vez en que se explotó, por lo que actualmente ocupa el tercer lugar entre las energías renovables, solo siendo antecedida por la energía hidráulica y la eólica.

Bibliografía

- ✓ Cordoba, L. (2007). *“Diseño de una planta Geotermica de generacion electrica de 50MW”*. Lima-Peru.
- ✓ Energiasrenovables.com. (n.d.). www.energiasrenovables.com/geotermica.
- ✓ *Experto insta a profundizar estudios sobre energía Geotérmica*. (21 de Septiembre de 2011). Periodico Hoy Digital, pág. 2.
- ✓ Geothermal Energy Association.
- ✓ Greenpeace, A. A. (2014). *El impacto de las energías renovables en la economía con el horizonte 2030*. In A. A. Greenpeace, *El impacto de las energías renovables en la economía con el horizonte 2030* (p. 6). España: Primera.
- ✓ IADB.ORG. *Estudio de impacto ambiental proyecto San Jacinto para la generación de 72 MW*.
- ✓ www.energy.ca.gov/reports/2004-06-08_700-04-006.pdf. (n.d.).
- ✓ *“Introduction to Geothermal Energy Slide Show”* - Geothermal Education Office, 2000.
Página web: <http://geothermal.marin.org/GEOpresentation/>
- ✓ *“La Energía Geotérmica: Posibilidades de Desarrollo en Chile”* - Alfredo Lahsen Azar. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 2000.
Página web: http://cabierta.uchile.cl/revista/14/articulos/pdf/14_6.pdf
- ✓ *“La energía interna de la tierra”* - Departamento de biología y geología. Instituto de enseñanza secundaria Salvador Victoria, Gobierno de Aragón, 2003
Página web:
<http://www.educa.aragob.es/iesmonre/dep/biogeo/presenta/einterna.ppt#1>
- ✓ *“La Geotermia: Tetera Natural”* – Juan Tonda, Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, La Ciencia para todos, Biblioteca digital, Primera edición, 1993.
Página web:
http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/htm/sec_13.htm
- ✓ *“Estrategias de Comisión Federal de Electricidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero”* - Vicente Aguinaco Bravo, Gerencia de Protección Ambiental. Comisión Federal de Electricidad, 2001.
Página web: www.cfe.gob.mx
- ✓ *“Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión”* - Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Documento ANC-0603-21-00, 2003.
Página web:
http://www.upme.gov.co/Si3ea/documentos/documentacion/energias_alternat

ivas/material_difusion/UTILIZACION_DE_LA_ENERGIA_GEOTERMICA_DOCUMENTO_DESCRIPTIVO.pdf

- ✓ “*Geothermal Energy*” - Adrien T. Robinson, Chicago Kent College of Law, 2003.
Página web:
<http://kentlaw.edu/classes/fbosselm/Spring2003/student%20presentations/Geothermal-Robinson.ppt>
- ✓ “*Geothermal Energy*” - Gabriel Kotliar, Department of Physics and Astronomy in Piscataway, The State University of New Jersey, 2004.
Página web:
<http://www.physics.rutgers.edu/~kotliar/honors/honsem02/somalwar/HonSem02/Geothermal%20Energy.ppt>
- ✓ “*The Basics of Geothermal Power Conversion*” - John W. Lund. Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, 2004.
Página web:
http://www.bgr.de/veransta/renewables_2004/presentations_DGP/Block1Introduction_pdf/3_Lund.pdf
- ✓ “*What is Geothermal Energy?*” – Mary H. Dickson, Mario Fanelli, International Geothermal Association, 2004.
Página web:
<http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php>

