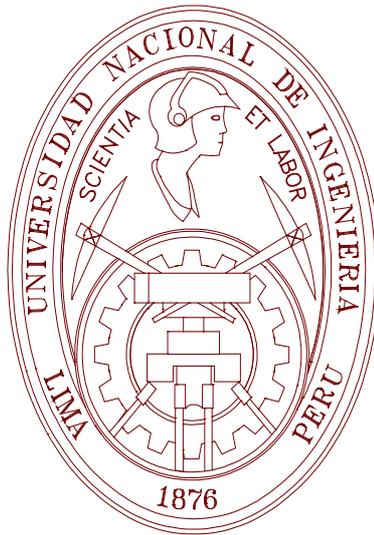


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**“DISEÑO DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 50MW”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

LUIS FELIPE CÓRDOVA ZAPATA

PROMOCION 2005-I

LIMA-PERU

2007

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi querida madre por haberme apoyado a lo largo de todos mis estudios universitarios, y quien ha estado a mi lado en los buenos y malos momentos.

ÍNDICE

	N° Página
Prólogo.....	(1)
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	(3)
1.1. Antecedentes.....	(4)
1.2. Justificación.....	(6)
1.2.1. Justificación Social.....	(6)
1.2.2. Justificación Económica.....	(7)
1.2.3. Justificación Técnica.....	(7)
1.2.4. Justificación Ambiental.....	(8)
1.3. Objetivos.....	(9)
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA.....	(10)
2.1. Energía Geotérmica.....	(10)
2.2. Clasificación de los Recursos Geotérmicos.....	(17)
2.3. Fluidos Hidrotérmicos.....	(18)
2.4. Aplicaciones de la Energía Geotérmica y sus Antecedentes.....	(20)
2.4.1. Aplicaciones Directas de los Recursos Geotérmicos.....	(22)
2.4.2. Aplicaciones Indirectas de los Recursos Geotérmicos.....	(30)
2.5. Generación de Energía Eléctrica.....	(32)
2.5.1. Generalidades.....	(32)
2.5.2. Sistemas de Generación Eléctrica.....	(38)
2.6. Desarrollo Mundial de la Generación Geotérmica de Electricidad.....	(44)
2.7. Potencial Geotérmico Nacional.....	(53)

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	(61)
3.1. Descripción técnica de una Planta Geotérmica.....	(61)
3.1.1. Tipos de Plantas.....	(61)
3.1.2. Desempeño de las Plantas de Generación.....	(68)
3.2. Marco Legal Nacional	(72)
CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA PLANTA.....	(74)
4.1. Consideraciones Preliminares.....	(75)
4.1.1. Consideraciones mecánicas.....	(75)
4.1.2. Consideraciones fluido-termodinámicas.....	(76)
4.1.3. Consideraciones ambientales.....	(76)
4.2. Cálculos.....	(79)
4.3. Resultados.....	(88)
4.3.1. Ciclo termodinámico.....	(88)
4.3.2. Selección de componentes.....	(100)
CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO-FINANCIERO.....	(111)
5.1. Criterios para la Evaluación Económica.....	(112)
5.2. Descripción de Inversiones, Costos e Ingresos.....	(113)
5.3. Evaluación Económica.....	(121)
5.4. Comentarios.....	(123)
5.5. Criterios para el Financiamiento.....	(125)
5.6. Entes con capacidad de Inversión.....	(128)
CONCLUSIONES.....	(129)
BIBLIOGRAFÍA.....	(131)
ANEXOS.....	(135)

NOMENCLATURA GENERAL

A continuación se describe la nomenclatura usada en los cálculos:

\dot{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.

Rex_v = Relación de expansión en la válvula de expansión, sin unidades.

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

Rex_b = 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.

\dot{q}_{hp} = Calor transferido del fluido geotérmico al precalentador, kW.

\dot{q}_{cp} = Calor transferido del precalentador al isopentano, kW.

ΔP_v = Pérdida de presión en el vaporizador, kPa.

\dot{q}_{hv} = Calor transferido del fluido geotérmico al vaporizador, kW.

\dot{q}_{cv} = Calor transferido del vaporizador al isopentano, kW.

ΔP_c = Pérdida de presión en el condensador, kPa.

IV

\dot{W}_b = Potencia de la bomba, kW.

η_b = Eficiencia de la bomba de condensado, sin unidades.

\dot{W}_t = Potencia de la turbina, kW.

η_t = Eficiencia de la turbina, sin unidades.

η_m = Eficiencia mecánica, sin unidades.

η_g = Eficiencia del generador, sin unidades.

\dot{W}_e = Potencia eléctrica, kW.

PRÓLOGO

El presente trabajo tiene como objetivo principal diseñar una planta geotérmica eléctrica de ciclo combinado, con una turbina de dos etapas y a potencia instalada de 50 MW.

El alcance del diseño es el estudio del ciclo termodinámico y la selección de los componentes de la planta geotérmica de generación eléctrica. El enfoque del trabajo es mixto, predominantemente se desarrolla una investigación de la energía geotérmica y se realizan los cálculos respectivos para la selección de equipos.

El punto de partida del presente proyecto es el estudio preliminar de los recursos geotérmicos en nuestro país que realizó el Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Electricidad y, en coordinación con la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL).

En el primer capítulo se realiza una introducción, la cual se basa en los antecedentes, la justificación y se explica el objetivo del presente proyecto.

En el segundo capítulo se instruye al lector con conceptos básicos sobre energía geotérmica, clasificación de los recursos geotérmicos, fluidos hidrotérmicos, las aplicaciones de la energía geotérmica y sus antecedentes, la generación de energía eléctrica, el desarrollo mundial y el potencial geotérmico nacional.

En el tercer capítulo se explica el fundamento teórico del diseño de la planta, el cual contiene la descripción técnica de una planta geotérmica y el marco legal nacional.

En el cuarto capítulo se describe el diseño de la planta, teniendo en cuenta unas consideraciones preliminares, para luego realizar los cálculos y presentar los resultados.

Y en el quinto capítulo, se realiza un estudio económico-financiero, para lo cual se explican los criterios para la evaluación económica, se describen las inversiones, los costos e ingresos para luego realizar la evaluación económica, también se mencionan los criterios para el financiamiento y los entes con capacidad de inversión para concluir demostrando la viabilidad de la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos de nuestro país.

El presente documento es de valiosa utilidad en varios aspectos. Desde el punto de vista académico, es una obra de consulta para estudiantes y profesionales de ingeniería que deseen iniciarse en el interesante mundo de la generación eléctrica con el uso de recursos geotérmicos. A nivel industrial, los recursos geotérmicos se pueden emplear en diferentes actividades industriales, las cuales se detallan en el presente proyecto.

Un especial agradecimiento al Centro Cultural Pablo Boner (CCPB) y al Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Mecánica Eléctrica (CEDIME), por el apoyo brindado durante la realización del presente proyecto y por su colaboración a mis compañeros Maikol Alexandr Aira Falcón y Diego Marco Antonio Trinidad Yupa.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Mediante el presente trabajo denominado “Diseño de una Planta Geotérmica de Generación Eléctrica de 50 MW” se espera demostrar la viabilidad de la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos de nuestro país en el campo geotérmico de Borateras (provincia de Tarata, departamento de Tacna).

Tiene la siguiente presentación capitular:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, es la presentación del proyecto, donde se indica el propósito de la tesis, lo que se espera demostrar.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA, describe algunos conceptos sobre la energía geotérmica que el lector debe conocer previamente, para la comprensión del contenido de la obra.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTO TEÓRICO, contiene la estructura teórica en que se basa el diseño de la planta geotérmica de generación eléctrica.

CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA PLANTA, describe en forma detallada los criterios de selección de cada uno de los componentes de la planta geotérmica.

CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO-FINANCIERO, se realiza una evaluación económico-financiera para demostrar que es viable el proyecto.

1.1. Antecedentes

La producción eléctrica en el país ha dado un crecimiento a partir de la década de 1970, hasta antes de la cual nuestra potencia de generación instalada era de tan solo 863 MW. Desde ese entonces la producción eléctrica ha ido en aumento hasta llegar a nuestro parque energético actual, el cual alcanza los 6200 MW de potencia instalada. En la Figura 1.1 se muestra la evolución de la potencia instalada en el país desde la década de 1970.

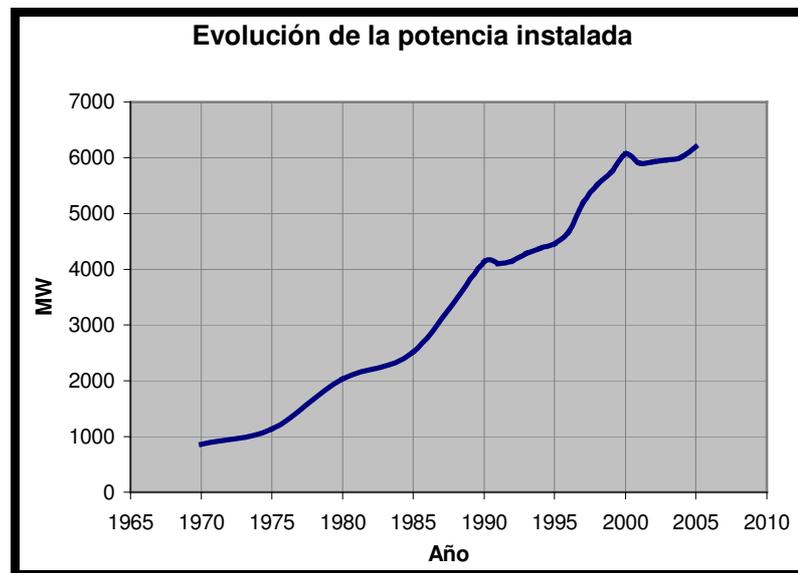


Figura 1.1 EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA EN EL PAÍS

Elaboración propia a partir del “Anuario estadístico electricidad 2005” [1]

Actualmente nuestra potencia instalada bordea los 6200 MW esta potencia es asumida de distinta manera por las diversas centrales existentes en el país y la producción de energía eléctrica de 25414 GW.h

En la Figura 1.2 se muestra la distribución de la potencia instalada y de la producción de energía eléctrica en función al tipo de central eléctrica.

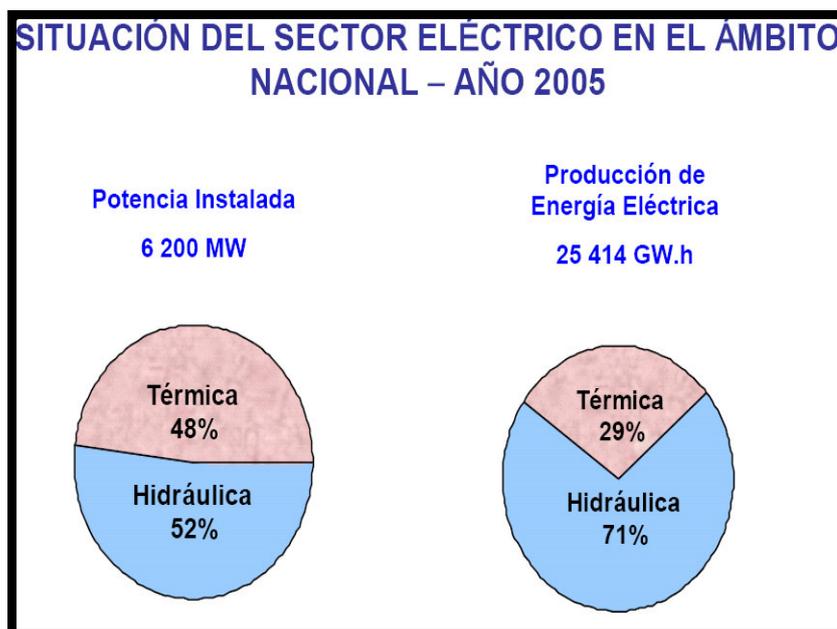


Figura 1.2 POTENCIA INSTALADA Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CENTRAL ELÉCTRICA
 “Situación de la Geotermia en el Perú” [26]

La energía térmica almacenada en el interior del planeta tiene un potencial energético enorme, cálculos científicos indican que apenas el 1% del calor contenido en 10 Km² de la tierra equivale a 500 veces la energía contenida por el petróleo existente en el mundo¹, a su vez es un recurso benigno y considerado bajo ciertas condiciones como renovable, que va de acuerdo con el control del medio ambiente y que asegura una buena conservación del mismo por las bajas emisiones de CO₂.

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos de nuestro país permitirá tener una fuente más de energía que favorecerá al desarrollo de diversas regiones de extrema pobreza, brindando muchas oportunidades desde diferentes aspectos, como también mejorar las condiciones de vida.

¹ Fuente: Fundamento del proyecto de la Ley N° 28546 16/06/05 Ley de Promoción y Utilización de Recursos Renovables No Convencionales en zonas rurales, aisladas y de frontera del país.

En el sur de nuestro país existe un potencial geotérmico aprovechable, pero que aún no ha sido cuantificado con exactitud. La explotación de los recursos geotérmicos debe ser orientado principalmente a la generación de energía eléctrica, debido a la lejanía de las zonas potenciales que hace difícil aprovechar directamente el calor para aplicación directa, como calefacción. El proyecto brinda un estudio y un análisis del aprovechamiento de estos recursos en la generación de electricidad.

1.2. Justificación

1.2.1. Justificación Social

La justificación social del presente proyecto se basa en los beneficios que produciría la construcción de una central geotérmica. Los beneficios sociales serían los siguientes:

- La energía geotérmica constituye una alternativa de diversificación de la matriz energética en el país, evitando la dependencia a sistemas basados en energéticos del tipo fósil.
- En los últimos años el Perú y los demás países de Latinoamérica, están difundiendo el uso de energías renovables, los motivos son variados, humanitarios, políticos, comerciales, etc., por iniciativa propia de los gobiernos y por la cooperación internacional. En fin todo esto nos permite tomar conciencia del uso de las energías renovables, lo que está haciendo fácil la introducción de tecnologías que las aprovechen . Todo este panorama está preparando el terreno para que la energía geotérmica se difunda a nivel nacional.

1.2.2. 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.
- El estado peruano a través del Ministerio de Energía y Minas promueve y fomenta el desarrollo de recursos renovables y/o no convencionales pudiendo dar inclusive la oportunidad de despachar en base para recibir mayores pagos por energía.
- 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.

1.2.3. Justificación Técnica

- La estructura y composición de una planta geotérmica es muy similar a la de una planta termoeléctrica de vapor, teniendo como diferencias la fuente de

calor y separadores de fase principalmente, por lo que se puede asegurar su repotenciación dependiendo tan solo de la disponibilidad de recursos.

- Los flujos residuales de la planta geotérmica pueden ser empleados en diversas aplicaciones en donde se aproveche la composición química de los fluidos así como el calor remanente.
- Las centrales geotérmicas no presentan aspectos críticos en su operación al contrastarlas con centrales térmicas convencionales y de ciclo combinado.

1.2.4. 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. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Diseñar una planta geotérmica eléctrica de ciclo combinado, con una turbina de dos etapas y a potencia instalada de 50 MW.
- Demostrar la viabilidad de la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos de nuestro país en el campo geotérmico de Borateras (provincia de Tarata, departamento de Tacna).

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA

2.1. Energía Geotérmica

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” [14]

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.

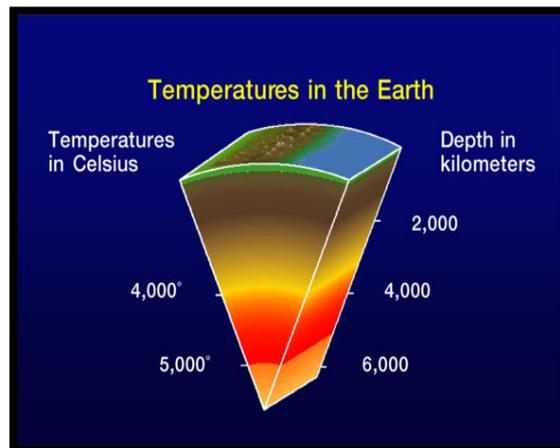


Figura 2.2 DISTRIBUCIÓN APROXIMADA DE TEMPERATURAS EN EL INTERIOR DE LA TIERRA (°C / KILOMETRO).

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

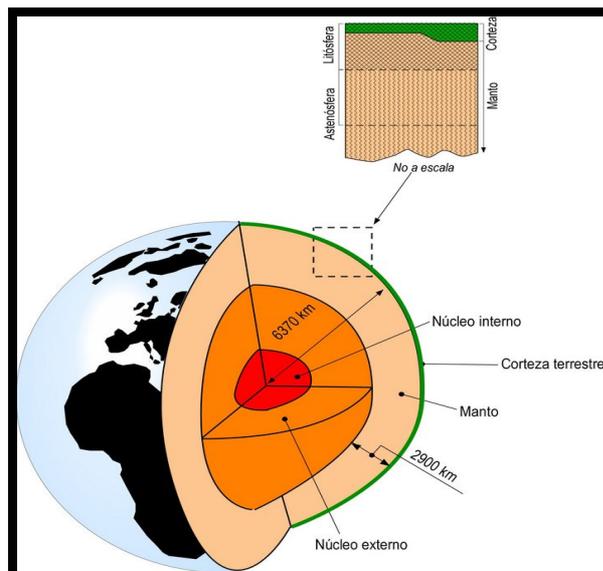


Figura 2.3 CAPAS DE LAS QUE ESTA COMPUESTA LA SUPERFICIE Y EL INTERIOR DE LA TIERRA

“What is Geothermal Energy?” [35]

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).

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).

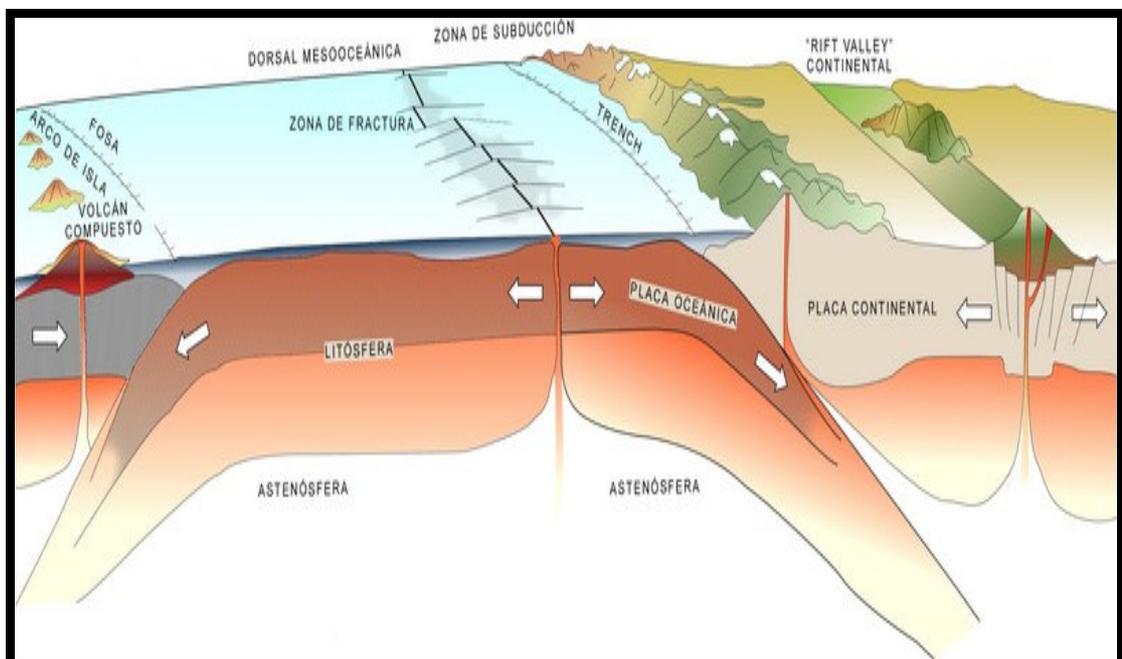


Figura 2.4 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA Y LOS FENÓMENOS QUE SE PRODUCEN POR EL MOVIMIENTO DE LAS PLACAS TECTÓNICAS.

“What is Geothermal Energy?” [35]

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)

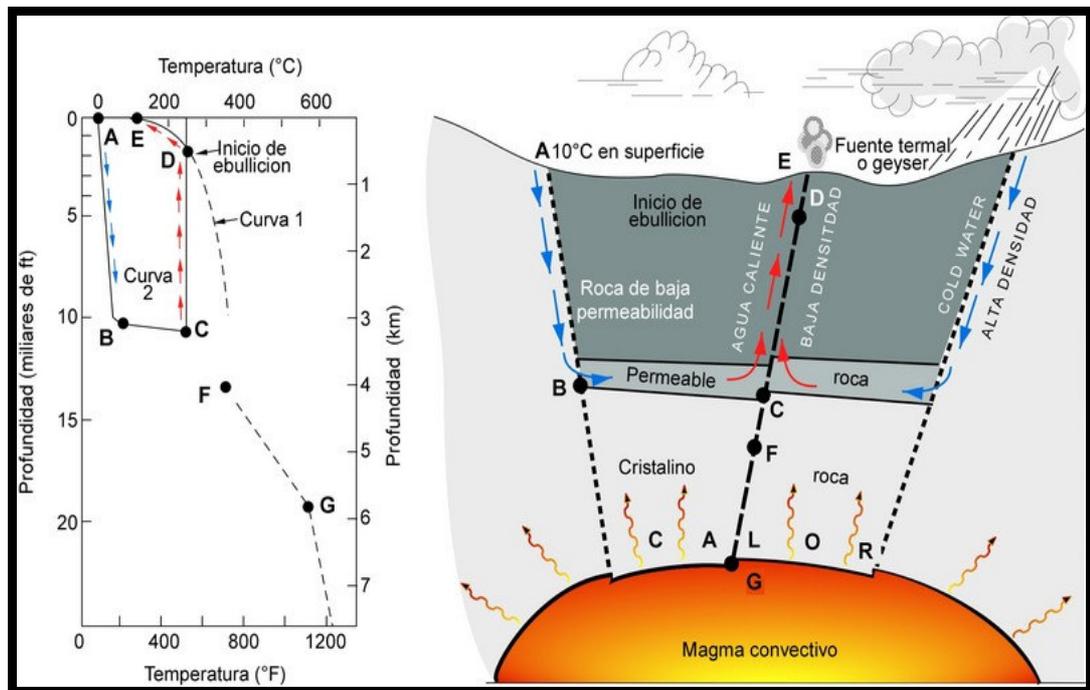


Figura 2.5 MODELO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO.

“What is Geothermal Energy?” [35]

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.

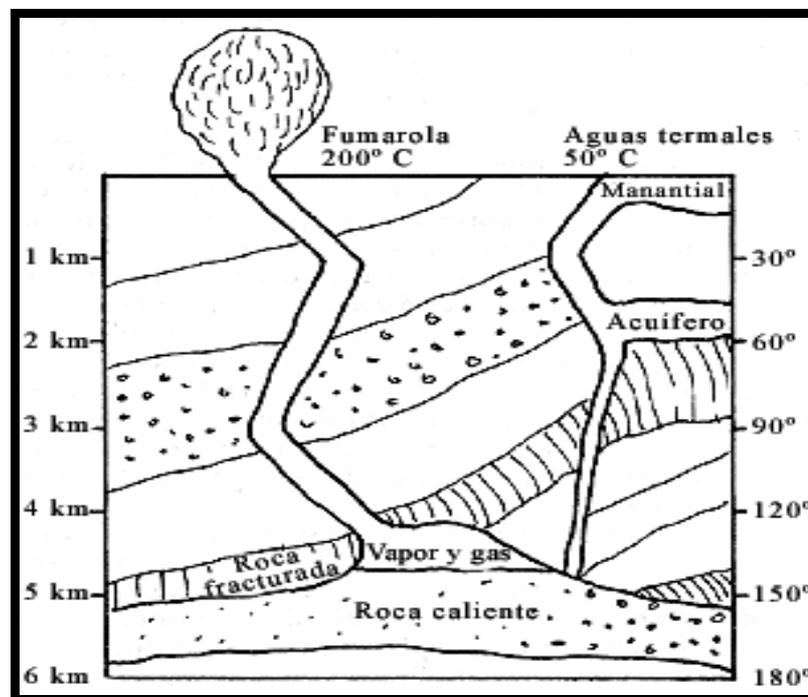


Figura 2.6 ESQUEMA GRÁFICO APROXIMADO DE UN DEPÓSITO GEOTÉRMICO

“La Geotermia: Tetera Natural” [17]

Por tanto la energía geotérmica es el calor de la Tierra que es liberado por conducción a un flujo promedio mundial de 82 mW/m^2 , el cual corresponde a un flujo de 99 mW/m^2 en los fondos oceánicos y a 57 mW/m^2 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 $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$. 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).

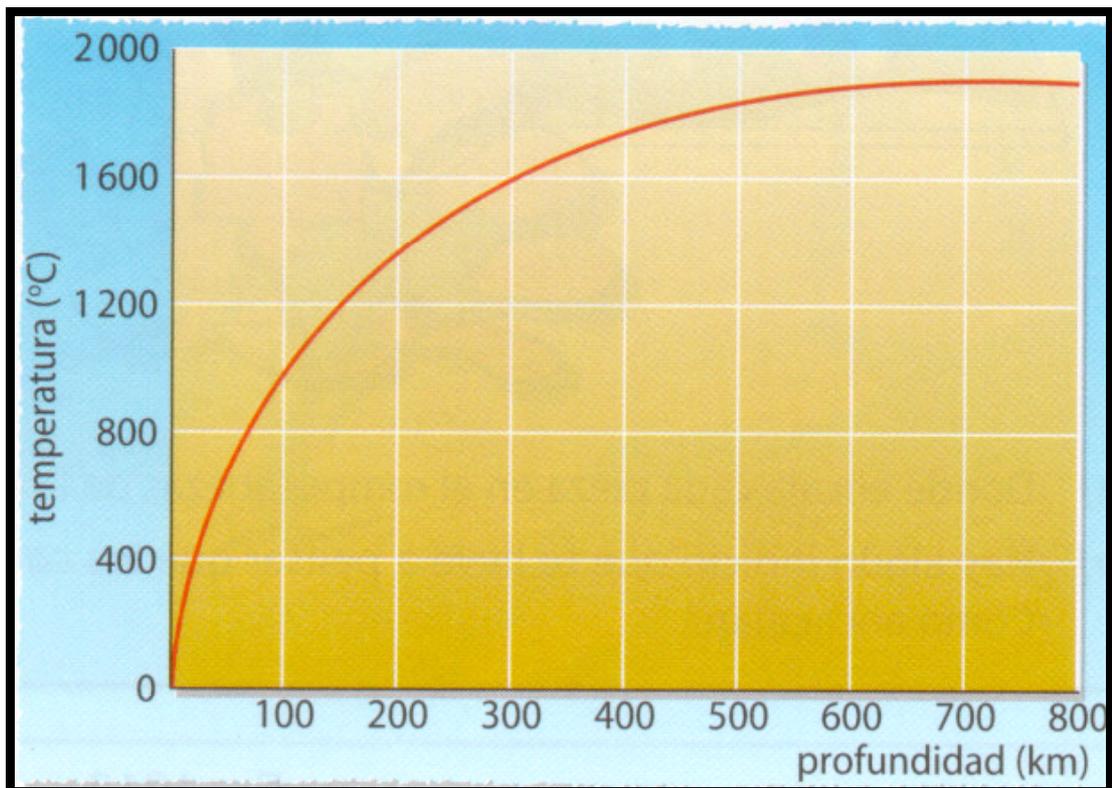


Figura 2.7 APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA ($^\circ\text{C}$) CON EL INCREMENTO DE PROFUNDIDAD (km)

“La Energía Interna de la tierra” [16]

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.

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.

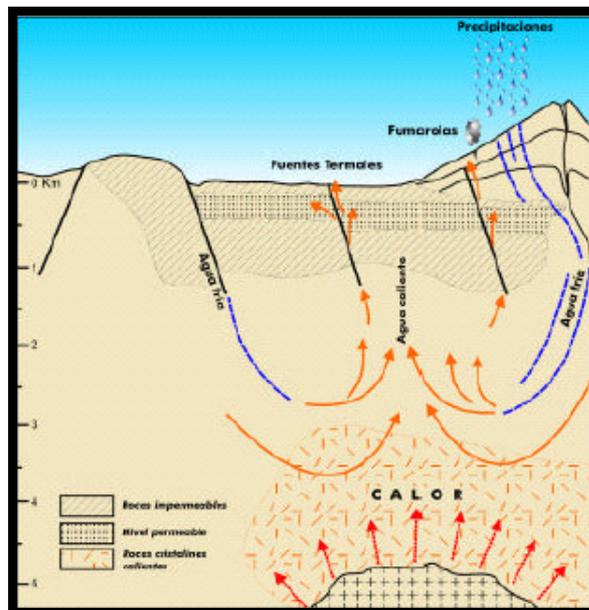


Figura 2.8 FACTORES NECESARIOS PARA LA FORMACIÓN DE CAMPOS O SISTEMAS GEOTERMALES

“La Energía Geotérmica: Posibilidades de Desarrollo en Chile” [15]

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 ($> 150^{\circ}\text{C}$). Los recursos de temperatura media a baja ($< 150^{\circ}\text{C}$), 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 geotermiales 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 .

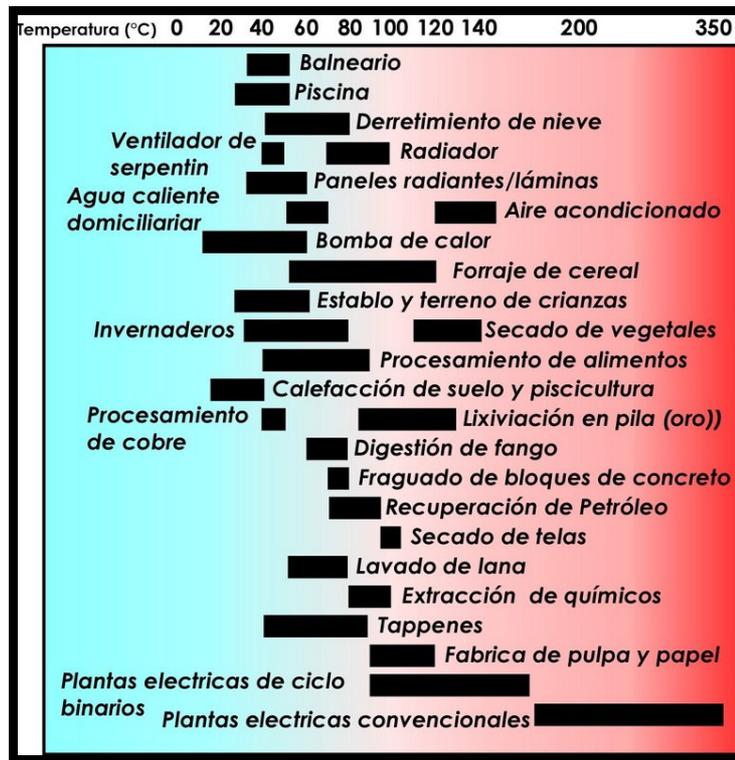


Figura 2.9 APLICACIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA, DIAGRAMA DE LINDAL, 1973

“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).

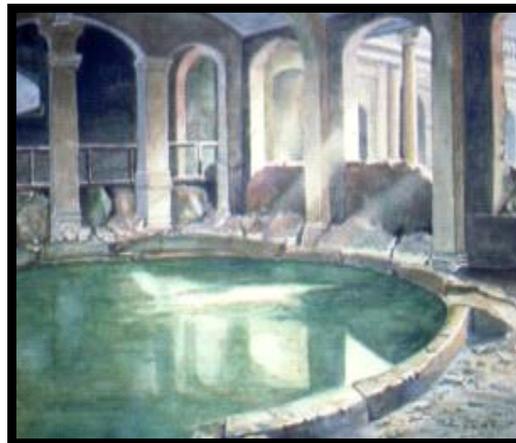


Figura 2.10 BALNEOLOGÍA

“Geothermal Energy” [10]

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 atestiguar 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).

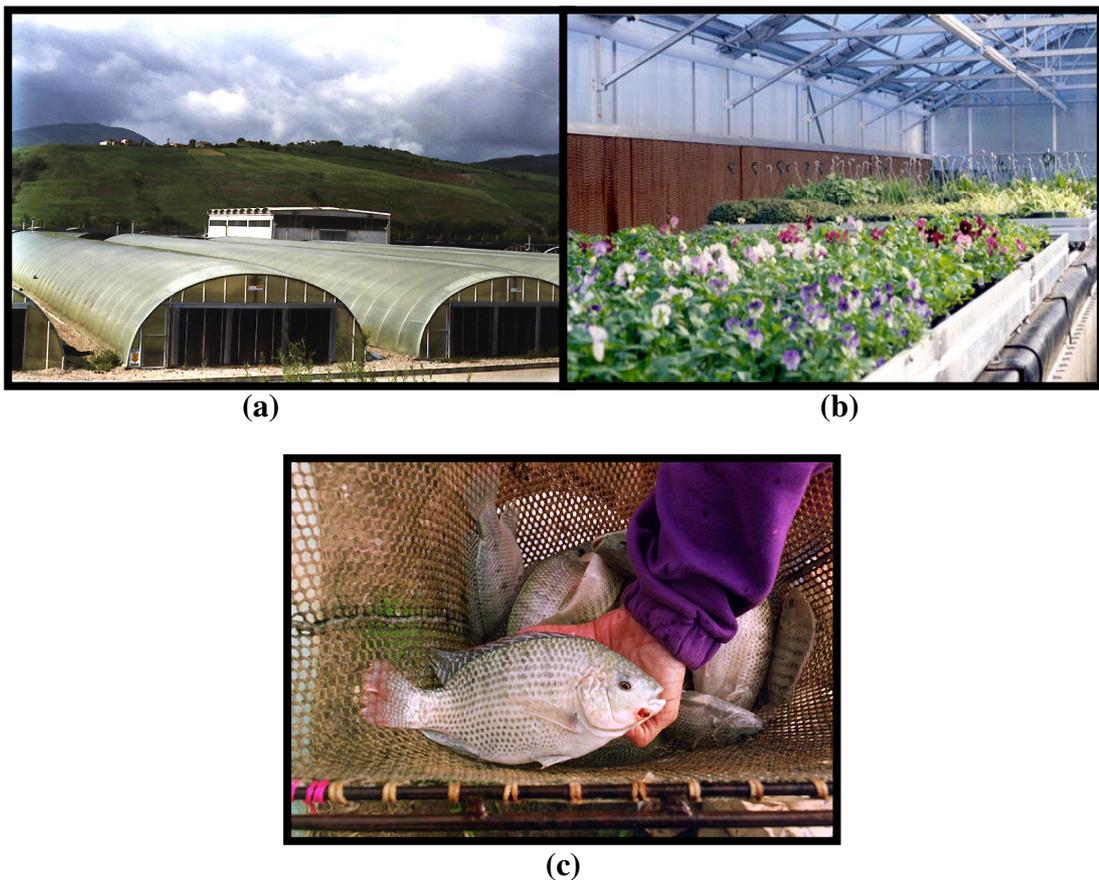


Figura 2.11 (a) EXTERIOR DE LOS INVERNADEROS, (b) INTERIOR DE LOS CULTIVOS EN UN INVERNADERO, (c) PESCADOS CRIADOS EN ESTANQUES ACONDICIONADOS CON FUENTES GEOTERMALES.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

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).

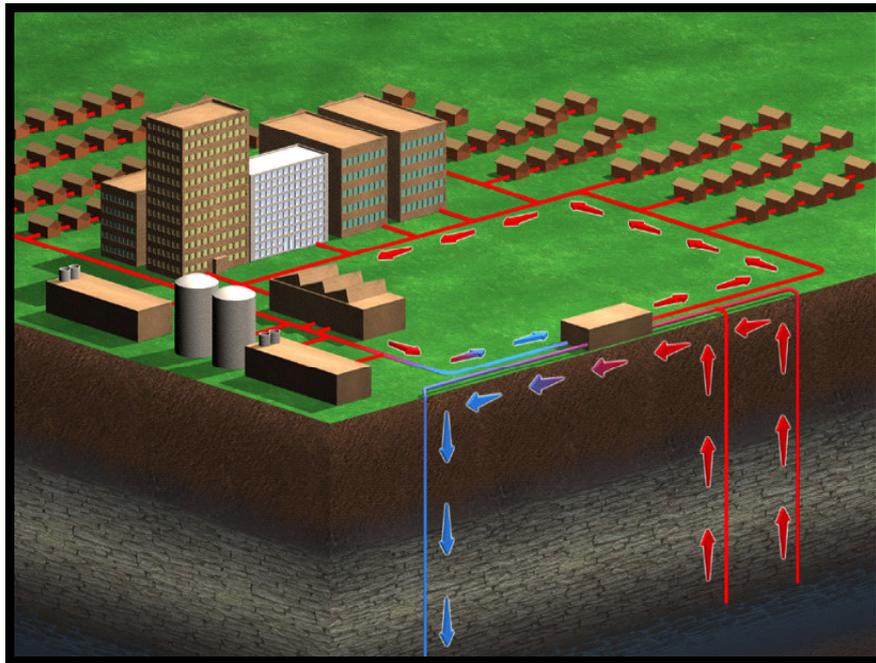


Figura 2.12 SISTEMA DE CALEFACCIÓN DISTRITAL CON FUENTES GEOTERMALES.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

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 1200 MWt 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.

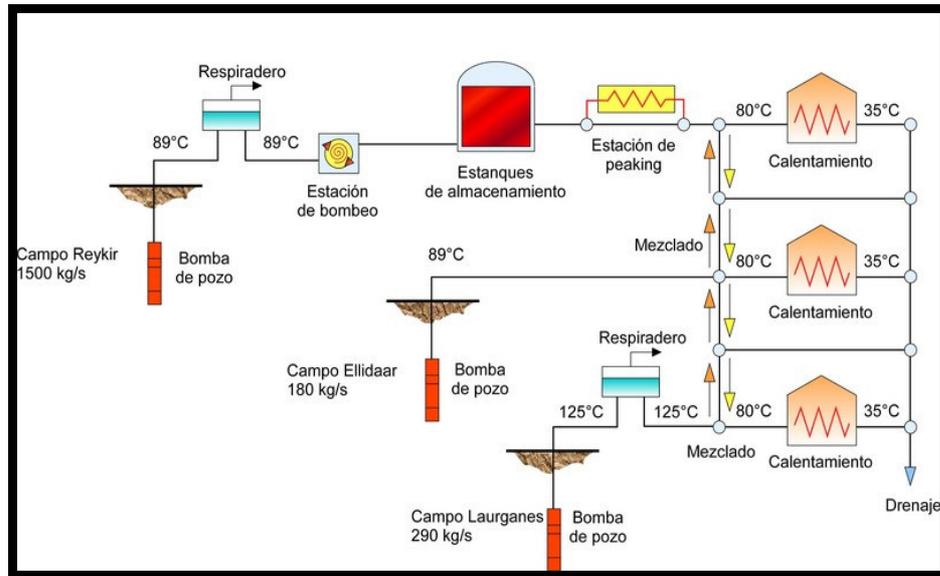


Figura 2.13 SISTEMA GEOTERMAL DE CALEFACCIÓN DISTRIITAL DE REYKYAVIK.

“What is Geothermal Energy?” [35]

En los comienzos del siglo XX, se estableció un esquema distrital piloto de calefacción hacia 1930 en la ciudad capital de Reikiavik para alimentar alrededor de 70 casas, dos albercas públicas, una escuela y un hospital. En 1943 no menos de 2300 casas recibían tal suministro. Luego se perforaron nuevas áreas, algunas dentro de los linderos de la ciudad, y gradualmente creció el sistema hasta que hacia 1975, el 99% de los edificios de Reikiavik estaban alimentados con calor para el servicio doméstico, comodidad de la que ahora disfrutan alrededor de 100000 personas.

En los Estados Unidos también ha habido pequeños sistemas de calefacción pública que utilizan el calor de la Tierra. En Boisé, Idaho, el área residencial de Warm Springs tenía calefacción doméstica (Figura 2.14) gracias a medios geotérmicos en 1890, mientras que en las Cataratas Klamath, en Oregón, se tiene calefacción doméstica de origen geotérmico desde el inicio del siglo y está ahora en proceso de expansión rápida.

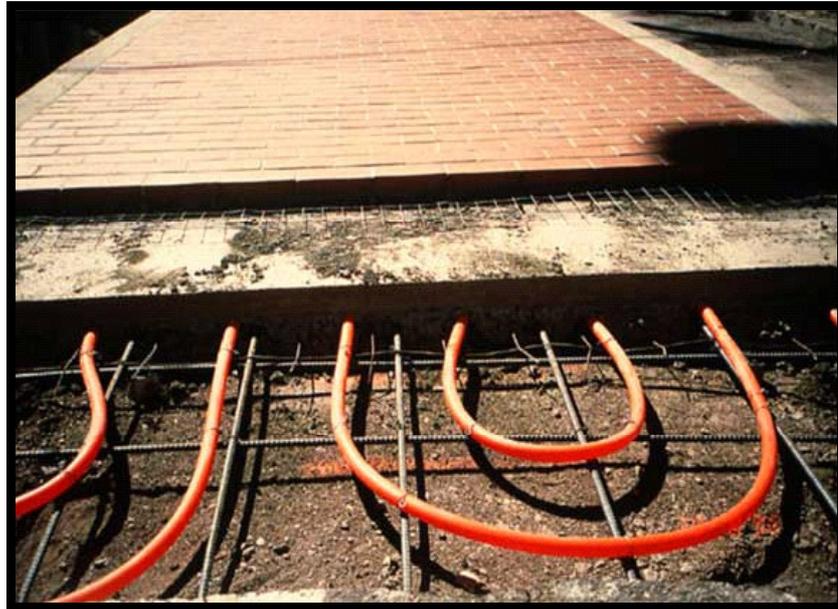


Figura 2.14 SISTEMA SENCILLO DE CALEFACCIÓN DOMICILIARIA.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

g) Refrigeración y aire acondicionado

La refrigeración es una opción factible de utilizar geotermia mediante la adaptación de equipos de absorción. La tecnología de estos equipos es bien conocida y se encuentra a disposición en el mercado. El ciclo de absorción es un proceso que utiliza calor como fuente de energía en vez de electricidad. El efecto de refrigeración se logra mediante la utilización de 2 fluidos: un refrigerante, que circula, se evapora y condensa, y un segundo fluido o absorbente. Para aplicaciones sobre 0°C (principalmente en refrigeración y procesos de aire acondicionado), el ciclo utiliza bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante. Para aplicaciones bajo 0°C se emplea un ciclo de amoníaco/agua, con amoniaco como refrigerante y agua como absorbente, los fluidos geotermiales proporcionan la energía geotérmica que alimenta estos equipos, a pesar que su eficiencia disminuye con temperaturas menores que 105°C.

El aire acondicionado geotermal (calefacción y enfriamiento) ha tenido una considerable expansión desde los años 1980, conjuntamente con la introducción y generalización del uso de bombas de calor . Los diferentes sistemas de bombas de calor disponibles permiten extraer y utilizar económicamente el calor contenido en cuerpos de baja temperatura, tales como suelos, acuíferos someros, lagunas etc. (Figura 2.15).

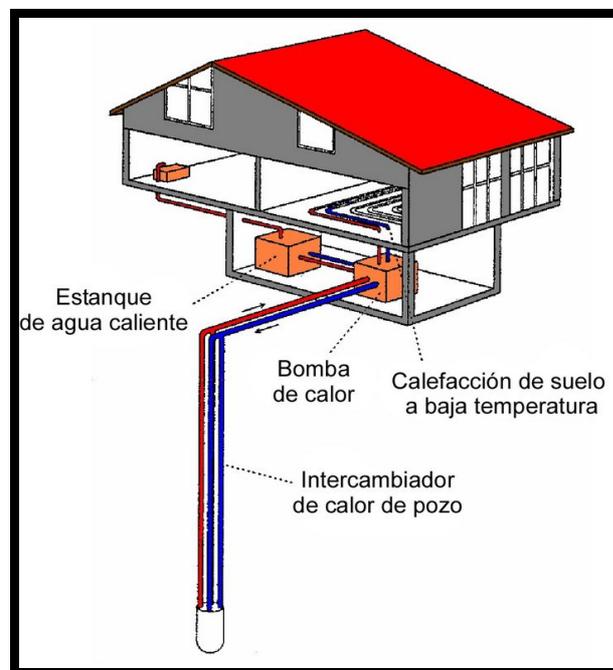


Figura 2.15 APLICACIÓN TÍPICA DE SISTEMA DE BOMBA DE CALOR.

“What is Geothermal Energy?” [35]

Las bombas de calor son máquinas que mueven el calor en una dirección opuesta a la dirección que tendería naturalmente, esto es, desde un espacio o cuerpo frío a uno más temperado. Una bomba de calor efectivamente no es más que una unidad de refrigeración. Cualquier artefacto de refrigeración transmite el calor desde un espacio (para mantenerlo frío) y descarga este calor a espacios de mayores temperaturas. La

única diferencia entre una bomba de calor y una unidad de refrigeración es el efecto deseado, enfriamiento para la unidad de refrigeración y calefacción para la bomba de calor. Un segundo factor distintivo de muchas bombas de calor es que son reversibles y pueden proporcionar ya sea calor o frío al espacio. Las bombas de calor, por supuesto, necesitan energía para operar pero en condiciones climáticas apropiadas y con un buen diseño, el balance energético sería positivo (Figura 2.16).

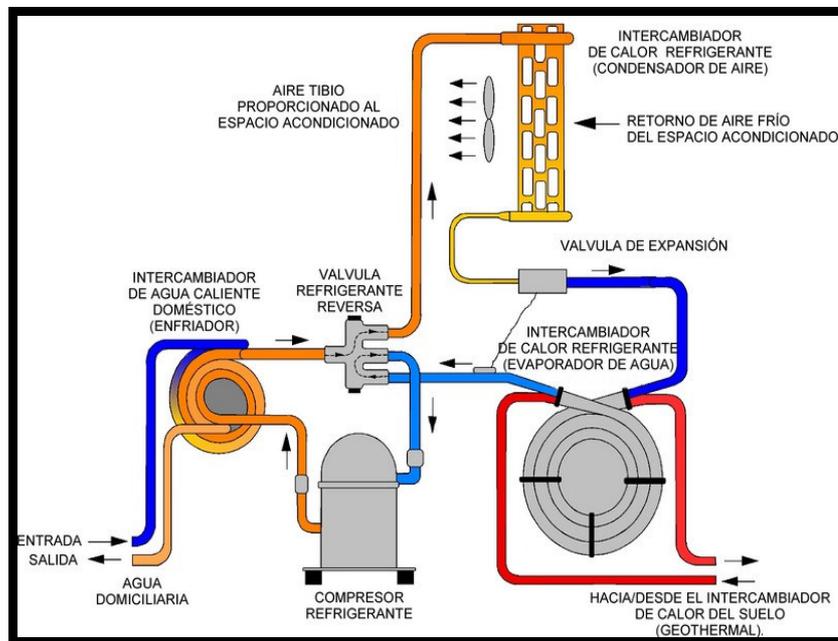


Figura 2.16 ESQUEMA DE UNA BOMBA DE CALOR EN CALEFACCIÓN.

“What is Geothermal Energy?” [35]

Los sistemas de bombas de calor del tipo acoplado al suelo y acoplado al agua han sido instalados en gran número, en 27 países y totalizan una capacidad termal de 6875 MWt (año 2000). La mayoría de estas instalaciones están en USA (4800 MWt), Suiza (500 MWt), Suecia (377 MWt), Canadá (360 MWt), Alemania (344 MWt) y Austria (228 MWt). En estos sistemas se utilizan acuíferos y suelos con temperaturas en un rango de 5 a 30°C.

2.4.2. 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 (Figura 2.17).

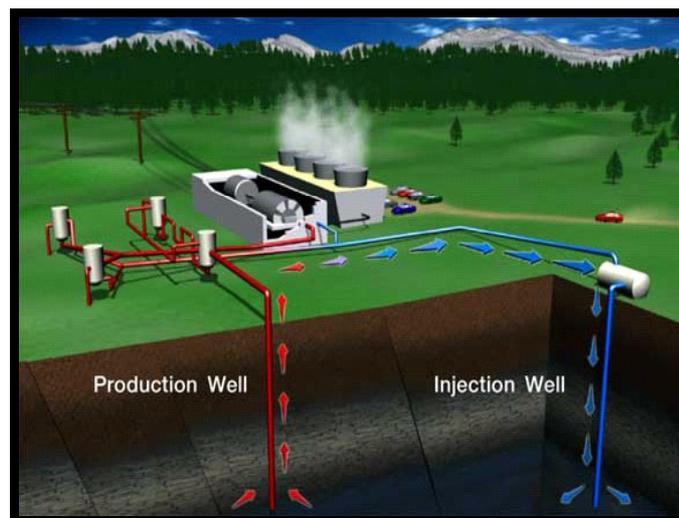


Figura 2.17 VISTA DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

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).

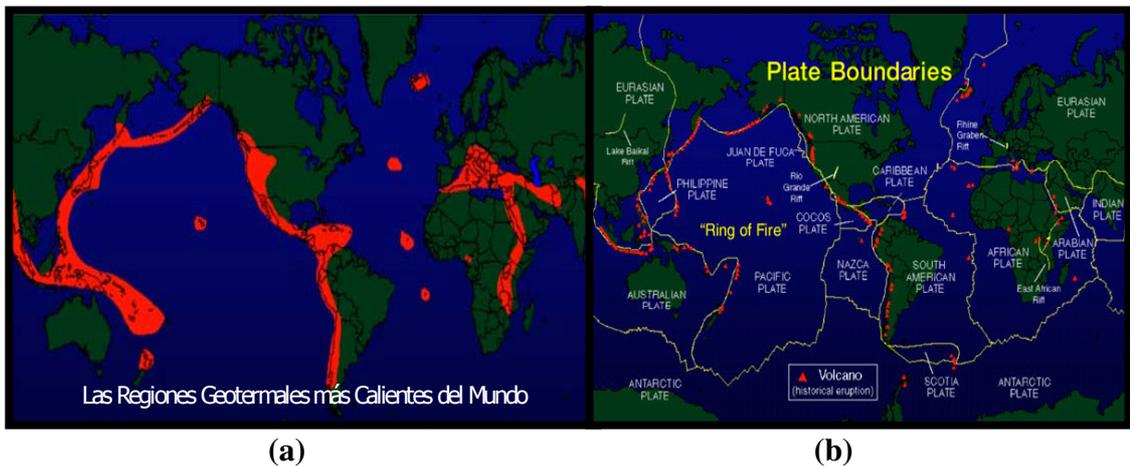


Figura 2.18 (a) REGIONES DE GRAN POTENCIAL GEOTERMAL, (b) ZONAS VOLCÁNICAS DEL MUNDO (MANIFESTACIONES VISUALES DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO).

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

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).

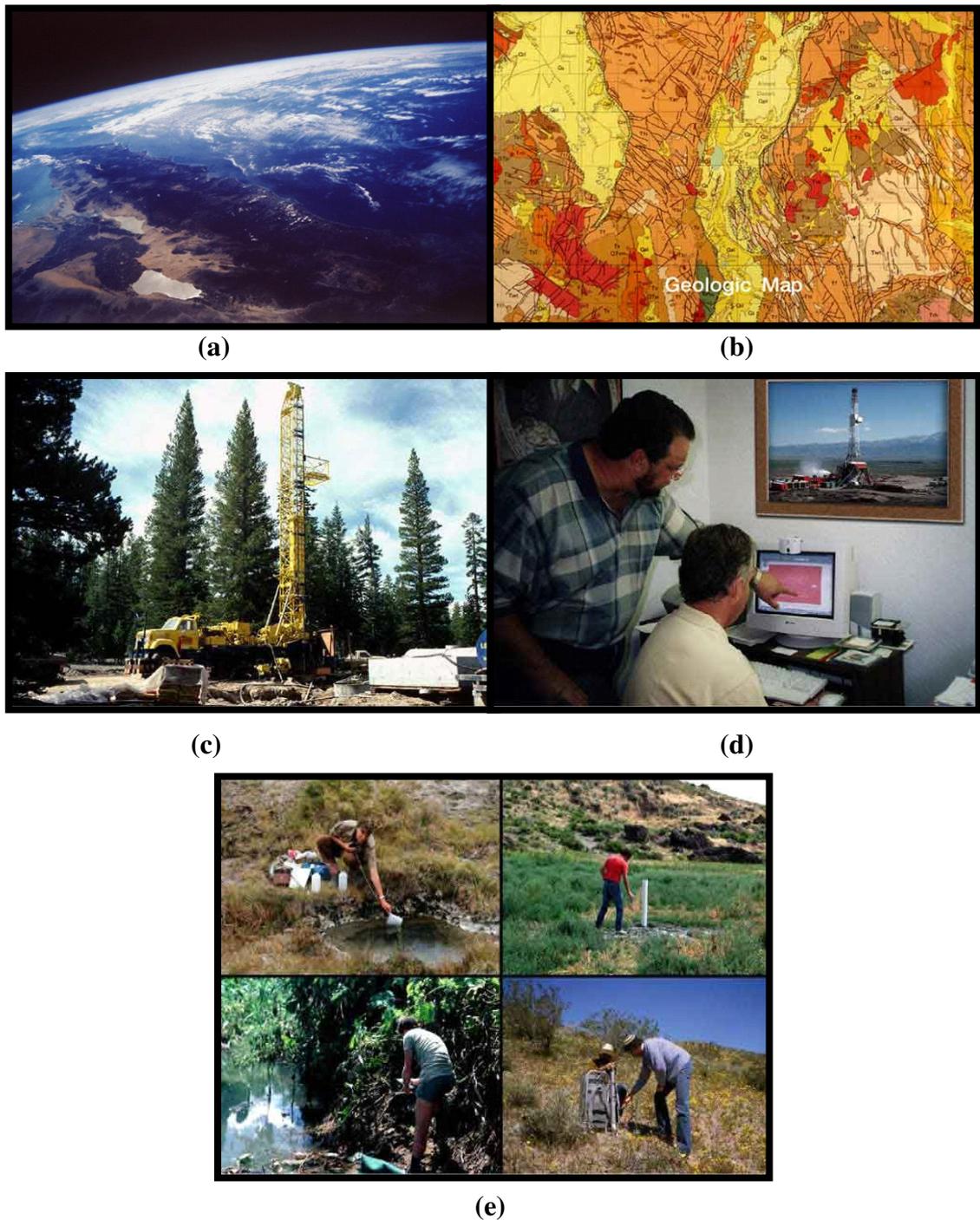


Figura 2.19 (a) IMÁGENES SATELITALES Y FOTOGRAFÍAS AÉREAS, (b) MAPA GEOLÓGICO, (c) PERFORACIÓN PARA PRUEBAS Y MEDICIÓN DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA, (d) DESARROLLO DE UN MODELO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO, (e) MEDICIÓN DE DATOS ELÉCTRICOS, MAGNÉTICOS, QUÍMICOS Y SÍSMICOS.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

Entre los métodos indirectos podemos mencionar:

- a) La obtención de imágenes infrarrojas del lugar desde satélites y después desde aviones, es decir, utilizando la técnica denominada percepción remota.
- b) 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.
- c) La medición directa de la temperatura con termómetros enterrados en el suelo.
- d) La creación de un modelo geológico tridimensional del yacimiento.
- e) 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).

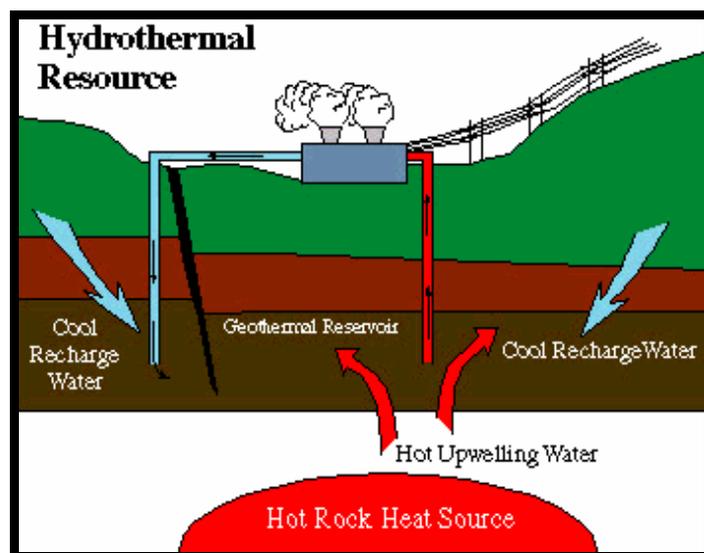


Figura 2.20 SISTEMA GENERAL GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RECURSOS GEOTÉRMICOS.

“Geothermal Energy” [11]

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 de producir energía eléctrica (Figura 2.21).

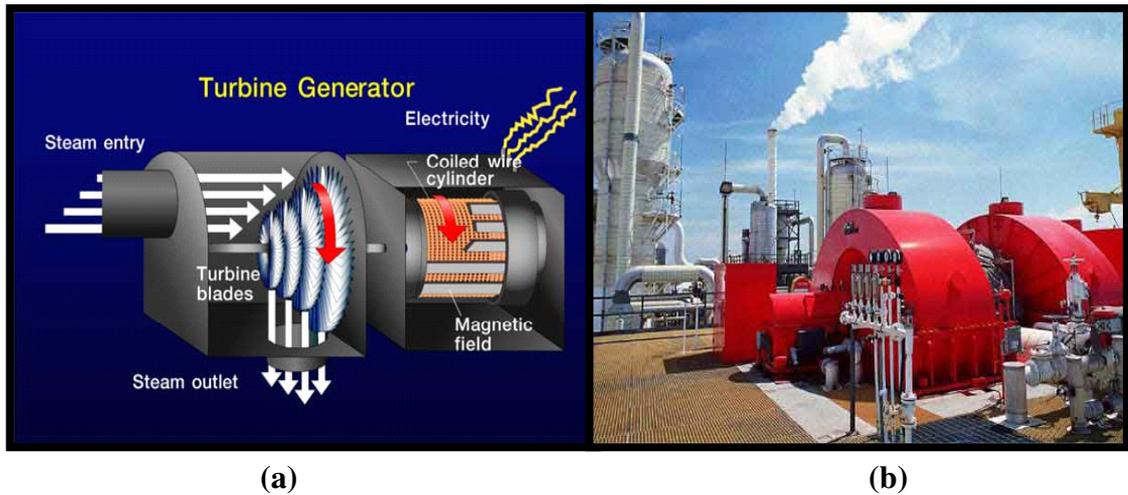


Figura 2.21 (a) ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN TURBOGENERADOR GEOTÉRMICO A VAPOR, (b) TURBOGENERADOR EN LA PLANTA GEOTÉRMICA VALLE IMPERIAL EN CALIFORNIA.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

- 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 (CO_2 y SO_2); 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).

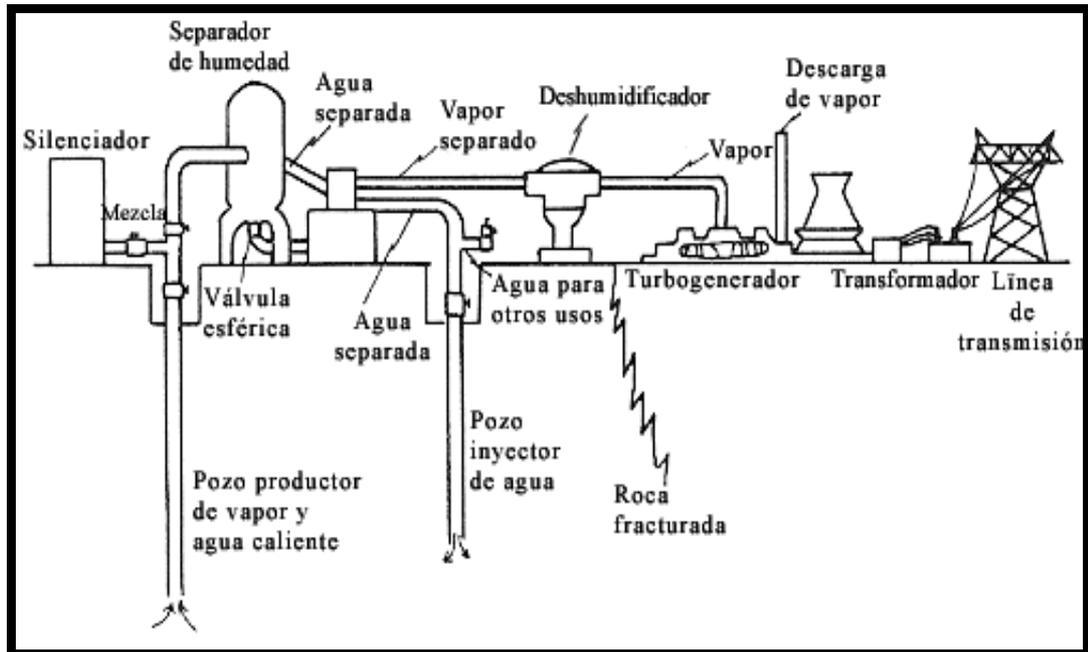


Figura 2.22 DIAGRAMA DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA.

“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 ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $350\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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).

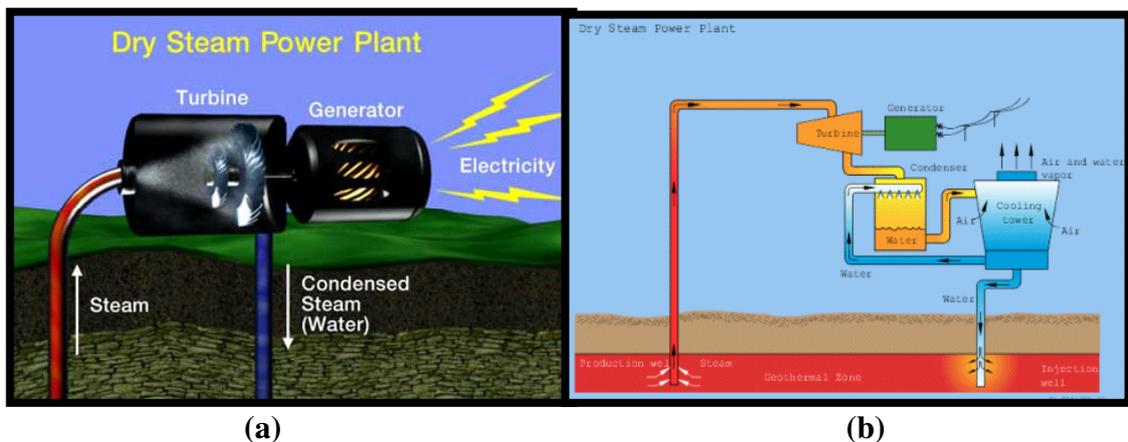
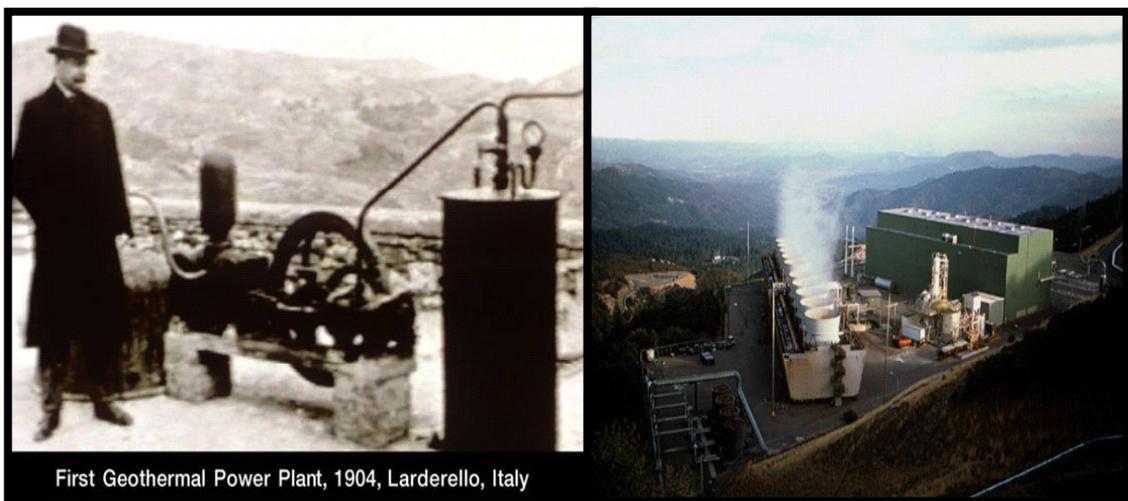


Figura 2.23 (a) ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA DRY STEAM, (b) ESQUEMA DE PRINCIPIO DE UN SISTEMA DRY STEAM.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

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)

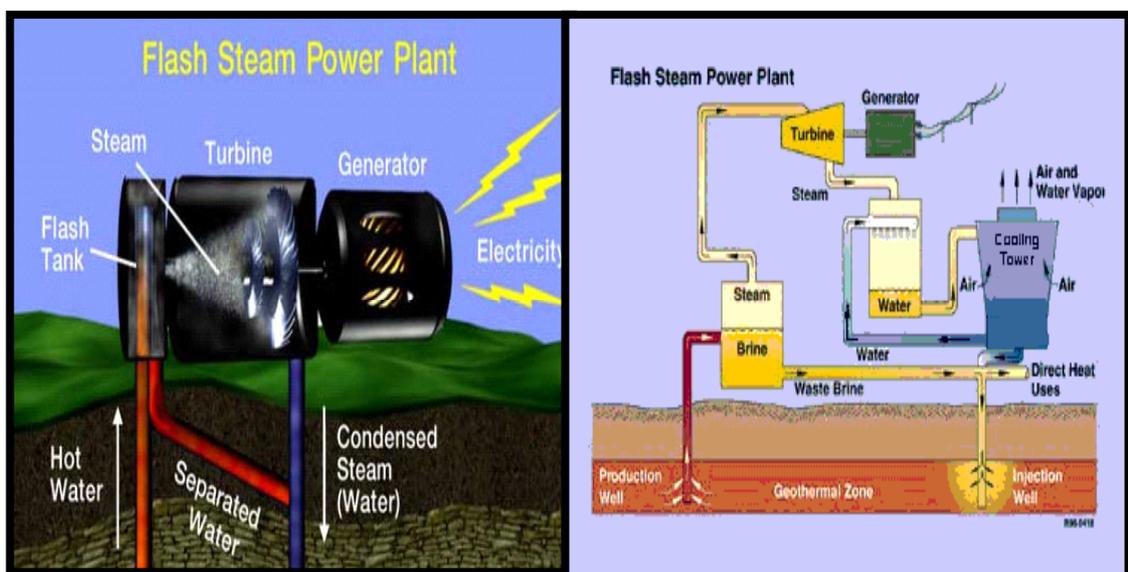
Figura 2.24 (a) PRIMERA PLANTA DE POTENCIA GEOTÉRMICA, 1904, LARDERELLO, ITALIA, (b) CAMPO DE VAPOR SECO THE GEYSERS, EN CALIFORNIA DEL NORTE.

“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 aun 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” [14]

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” [14]

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).

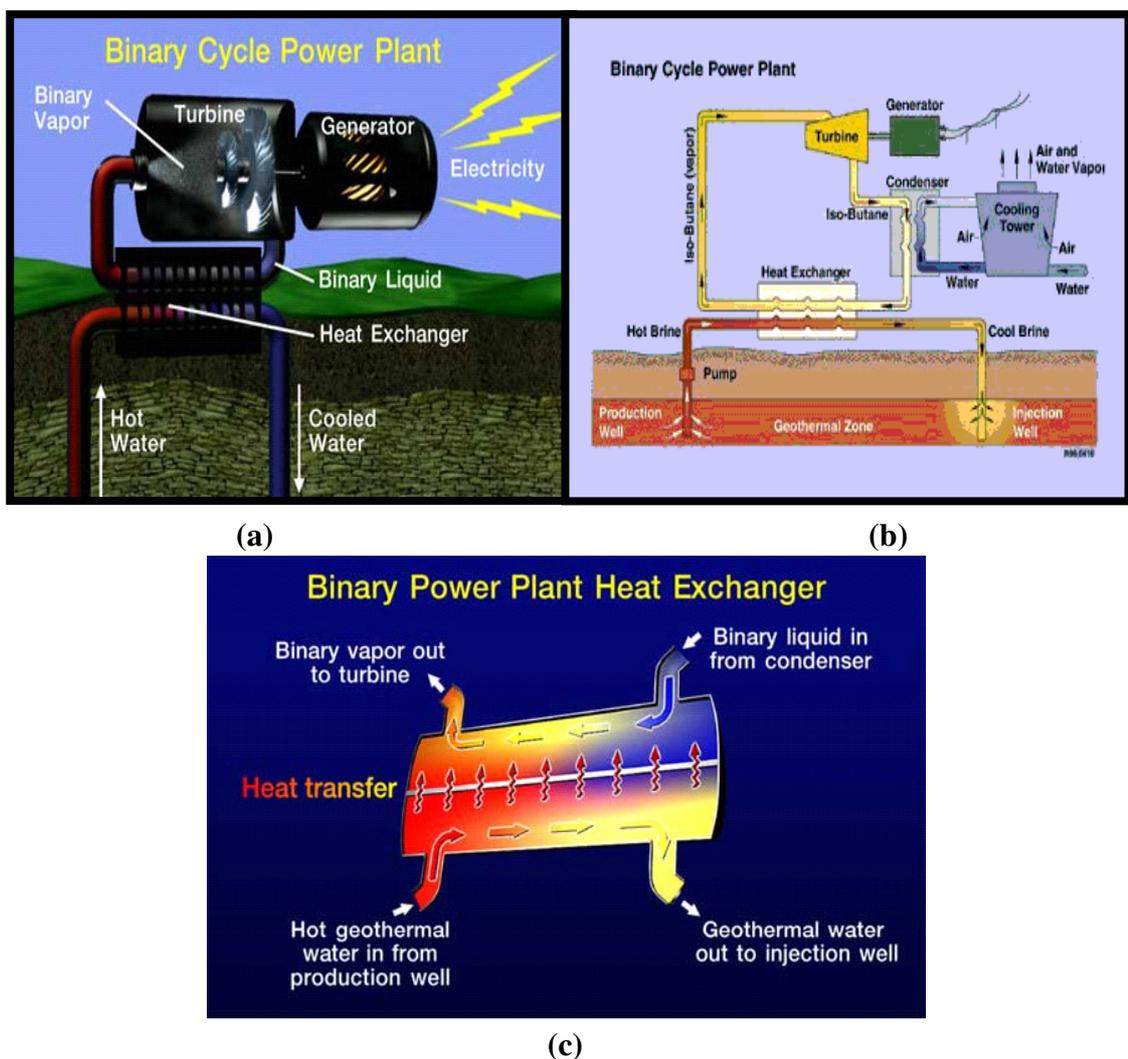


Figura 2.27 (a) ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA BINAY CYCLE, (b) ESQUEMA DE PRINCIPIO DE UN SISTEMA BINARY CYCLE, (c) INTERCAMBIADOR DE CALOR DE UN SISTEMA BINARY CYCLE.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

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).

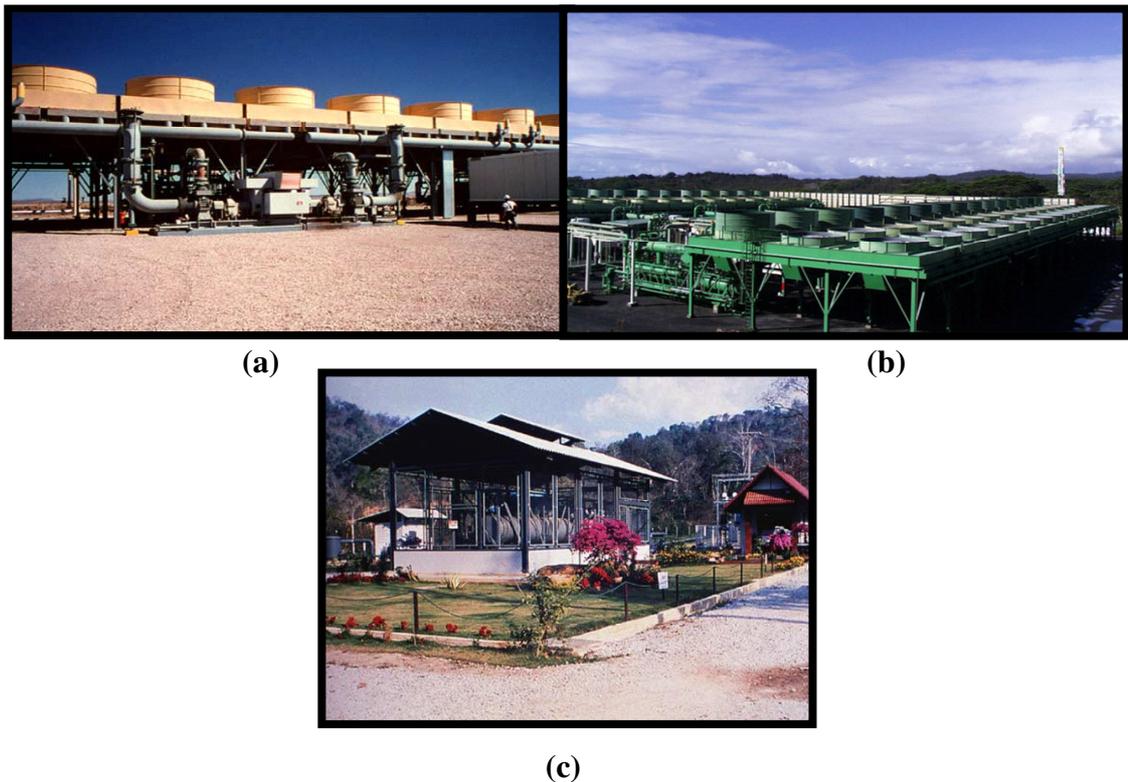


Figura 2.28 (a) PLANTA DE SISTEMA BINARY CYCLE EN SODA LAKE, NEVADA, (b) PLANTA DE POTENCIA GEOTÉRMICA EN LA GRAN ISLA DE HAWAI, (c) PLANTA GEOTÉRMICA EN COLMILLO, TAILANDIA.

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	755	5,681	2.11
Mexico	753	755	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	7,974	48,545	
TOTAL	6,833	7,974	11,398				

(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.

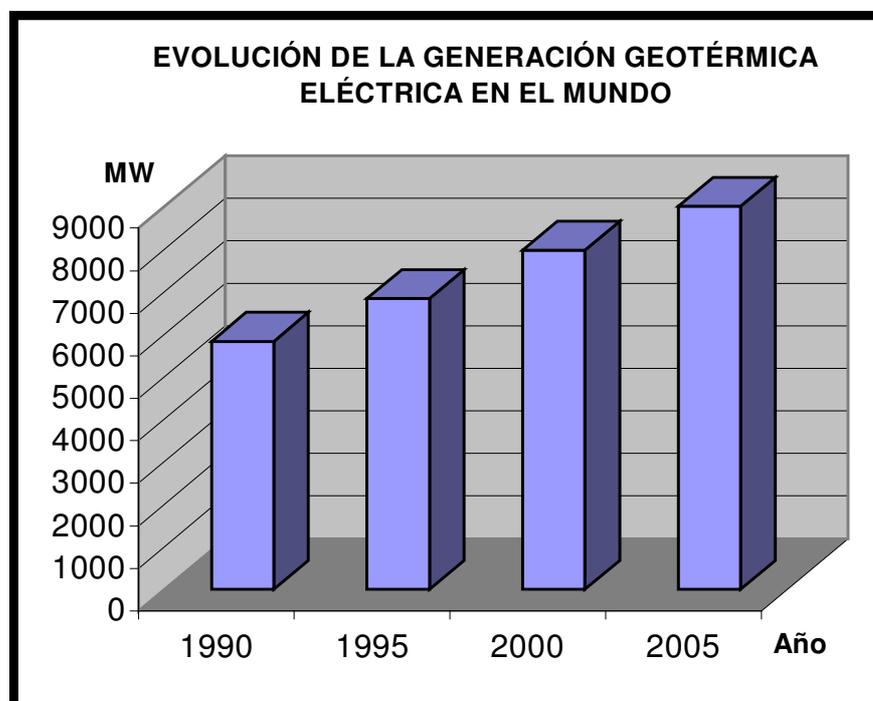


Figura 2.29 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA ELÉCTRICA EN EL MUNDO.

Elaboración propia a partir de “What is Geothermal Energy” [35]

Pais	Energía térmica instalada (MW _t)	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	266
Croatia	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” [35]

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%).

a) Desarrollo en USA

En Estados Unidos de Norteamérica (USA) se ubican 18 puntos de extracción. La mayor planta de generación geotérmica está ubicada en la parte norte de California, USA. Esta planta alcanzó su máximo de potencia instalada en 1989 con 1967 MWe.

En USA, los estados con mayor cantidad de instalaciones de plantas geotérmicas son California (7.3% de la demanda), Nevada y UTA (Figura 2.30); con gran potencial en los estados de Idaho, New México, Arizona, Oregon y Wyoming. Se espera que se desarrollen proyectos por 15000 MWe en USA.

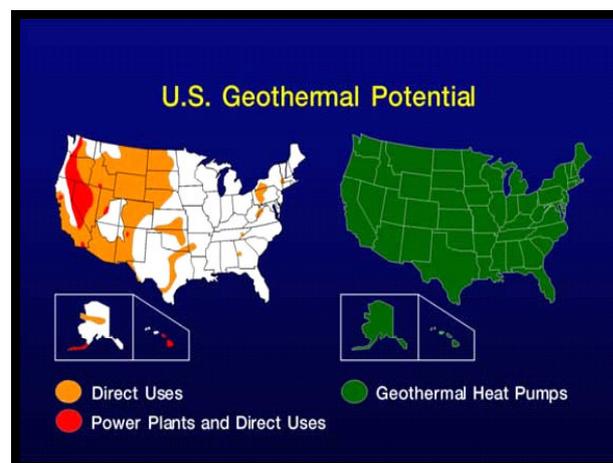


Figura 2.30 POTENCIAL GEOTÉRMICO EN USA.

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

b) Desarrollo en Italia

La explotación eléctrica de la geotérmica comenzó a finales del siglo XIX en Italia. En la actualidad hay un complejo de varias plantas geotérmicas con una capacidad instalada total que sobrepasa los 400 MW (Figura 2.31), que alimenta energía a la red integrada de la organización del estado italiano Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, conocida comúnmente como 'ENEL'.



Figura 2.31 PLANTA GEOTÉRMICA LARDERELLO (487 MW) – ITALIA
“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

c) Desarrollo en Islandia

Países como Islandia han presentado tasas de crecimiento de 16.7% pasando de 283 GWh a 1323 GWh en igual periodo.

Cabe señalar que en otros ámbitos, el uso de la geotermia se ha masificado en este país. A modo de ejemplo, el 86% de los hogares en Islandia es calefactado a través de 200 redes de distribución de calor de fuentes geotérmicas. Este país presenta las mayores tasas de crecimiento en el desarrollo de la geotermia.

d) Desarrollo en Filipinas

Filipinas se ha convertido en el segundo país productor de energía eléctrica generada geotermalmente. En el año 2000, Filipinas tenía una capacidad instalada de 1909 MWe. En el futuro inmediato, los geotérmicos filipinos planean desarrollar o expandir los campos de explotación y construir nuevas plantas en colaboración con la industria privada, mejorar el manejo de las reservas existentes e instalar ciclos que aprovechen el calor desperdiciado durante el proceso (Figura 2.32).

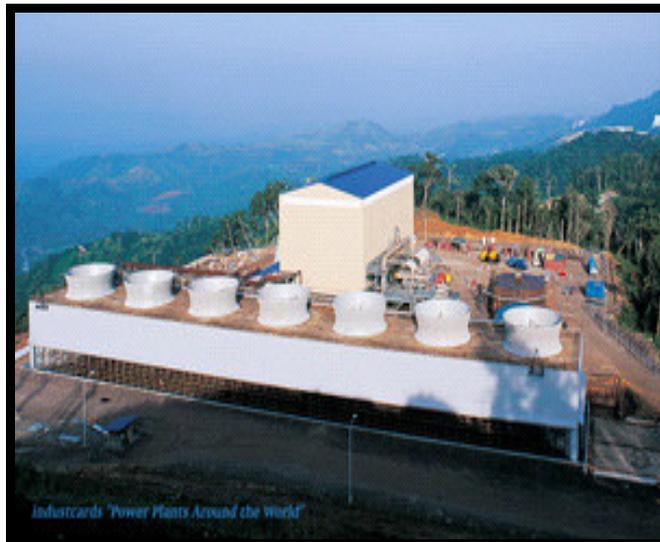


Figura 2.32 PLANTA GEOTÉRMICA MAHANAGDONG (180 MW). FILIPINAS

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

e) Desarrollo en Nueva Zelanda

Desde 1990 no ha habido un alto crecimiento en la capacidad de generación de energía geotérmica, en el año 2000 tenía una potencia instalada de 437 MWe. El campo más grande sigue siendo Wairakei (Figura 2.33), con 156 MWe de producción y se planea producir 24 MWe más. La planta de Ohaaki es la segunda con 108 MWe producidos.



Figura 2.33 PLANTA GEOTÉRMICA WAIRAKEI(156 MW) NUEVA ZELANDA
 “Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

f) 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).

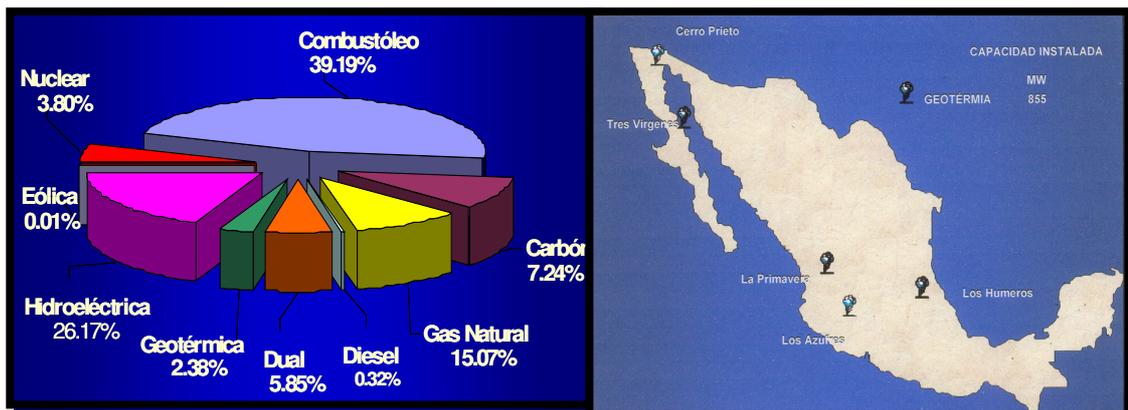


Figura 2.34 (a) FUENTES ENERGÉTICAS EN MÉXICO, (b) POTENCIA
 INSTALADA DE LAS PLANTAS GEOTÉRMICAS EN MÉXICO

“Estrategias de Comisión Federal de Electricidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero” [6]

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.

g) Desarrollo en Chile

Las exploraciones geotérmicas en Chile se iniciaron en 1968, se creó el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica. Como una primera etapa de los estudios, las exploraciones se restringieron a las Regiones de Tarapacá y Antofagasta por ser éstas las más deficitarias en recursos energéticos e hídricos del país.

A partir de diciembre de 1999 se ha iniciado un proyecto de tres años, denominado “Caracterización y Evaluación de los Recursos Geotérmicos de la Zona Central-Sur de Chile: Posibilidades de Uso en Generación Eléctrica y Aplicaciones Directas”. Este proyecto es llevado a cabo por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile en colaboración con la Empresa Nacional del Petróleo y con el apoyo del Instituto Internacional de Investigaciones Geotérmicas de Italia, del Instituto de Geología General y Aplicada de la Universidad de Munich (Alemania) y del Instituto Geotermal de la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda).

Según estudios de la Universidad de Chile, el potencial geotérmico en Chile es de 16000 MWe (Figura 2.35). A modo de comparación, el potencial geotérmico en USA está calculado en 40000 MWe.

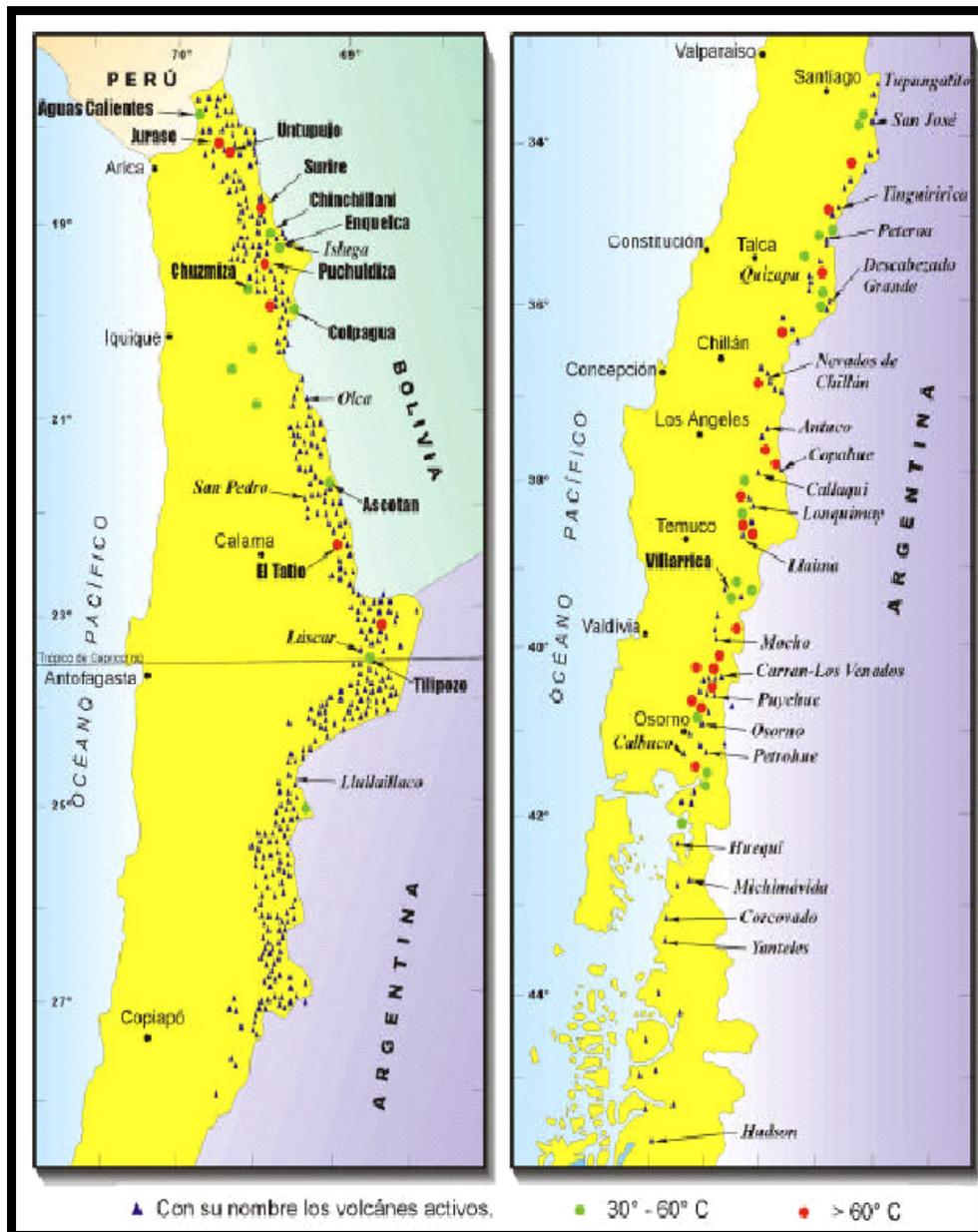


Figura 2.35 POTENCIAL GEOTÉRMICO EN CHILE

“La Energía Geotérmica: Posibilidades de Desarrollo en Chile” [15]

El desarrollo en Argentina es muy bajo, limitándose a plantas experimentales. En Ecuador, existe 1 proyecto geotérmico de algunos MWe para los próximos 10 años.

Actualmente, la generación geotérmica representa alrededor del 0.26% de la capacidad de generación eléctrica instalada a nivel mundial.

2.7. Potencial Geotérmico Nacional

La energía geotérmica es un recurso benigno y renovable, que va de acuerdo con el control del medio ambiente y que asegura una buena conservación del mismo. El aprovechamiento de este recurso permitirá tener una fuente más de generación de energía que favorecerá al desarrollo de diversas regiones de extrema pobreza.

La energía geotérmica se puede aplicar en la industria, comercio y el sector domiciliario, para la generación de electricidad o el calentamiento de agua y calefacción de ambientes.

Se han realizado los siguientes avances hasta la fecha:

- En 1975, la empresa estatal MINERO PERU efectuó estudios de exploración preliminar de las manifestaciones geotermales de Calacoa y Salinas en Moquegua.
- En 1976, Geothermal Energy Research del Japón, efectuó trabajos de exploraciones preliminares en la cuenca del Vilcanota en Cusco
- En 1977, el INIE efectuó el primer censo de manifestaciones geotermales
- En 1978, el INGEMMET elaboró un inventario y agrupación geográfica de afloramientos geotermales, se identificaron las siguientes regiones geotérmicas (Figura 2.36):

I) Cajamarca

II) Huaraz

III) Churín

IV) Central

V) Cadena de conos volcánicos

VI) Puno – Cusco

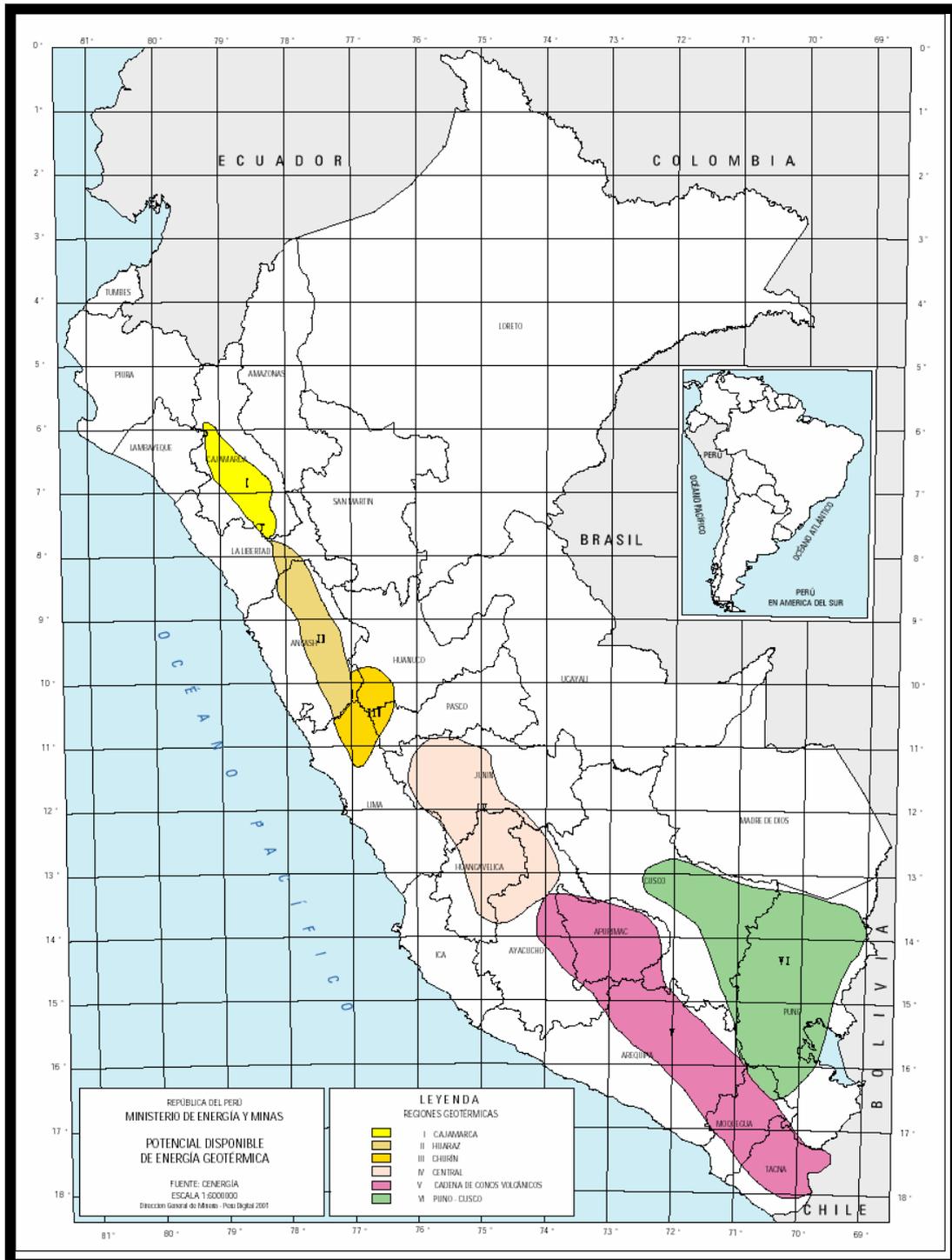


Figura 2.36 REGIONES CON POTENCIAL GEOTÉRMICO A NIVEL NACIONAL.

“Potencial disponible de Energía Geotérmica” [18]

- Con la iniciativa del Ministerio de Energía y Minas y el apoyo de la Cooperación Técnica Italiana (CTI) en la década de los ochenta se contrató a la empresa consultora CENERGIA para estudios preliminares de los recursos geotérmicos en nuestro país (Tabla 2.3).

PROYECTOS PARA LA EXPLOTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A NIVEL DE ESTUDIO DE FACTIBILIDAD				
No.	LOTE GEOTÉRMICO	UBICACIÓN	TEMPERATURAS	BENEFICIO PROYECTO
1	TUTUPACA	Dpto. de Tacna y parte del Dpto. de Moquegua	SiO ₂ : 180°C Na/K : 240°C	* Cubrir la demanda de energía eléctrica Cujone, Quellaveco y el Dpto. de Moquegua
2	CALACOA	Sierra de Moquegua	SiO ₂ : 110 - 160°C Na/K : 180 - 190°C	* Podría cubrir parcialmente los requerimientos del Sistema Eléctrico Tacna-Moquegua * Complejo Minero de Toquepala Ampliación de Cujone * Ampliación de Quellaveco * Programas de desarrollo industrial de las futuras inversiones en la región
	CHALLAPALCA	Altiplano de los departamentos de Tacna y parte de Puno	SiO ₂ : 192°C Na/K : 182 - 232°C Na/K/Ca : 184 - 212°C Na/K/Ca/Mg : 184 - 240°C Na/Li : 204 - 240°C K/Mg : 87 - 183°C	
3	AREQUIPA	Departamento de Arequipa Lagunas Salinas - Chachani Laguna Chivay Laguna Callkoma	SiO ₂ : 170°C SiO ₂ : 190°C	* Instalación de una planta geotérmica mediana (50 MW) * Potenciamiento del turismo en el Valle del Colca

Tabla 2.3 LOTES GEOTÉRMICOS IDENTIFICADOS PARA LA EXPLOTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

“Generación Eléctrica a partir de Fuentes Nuevas: Energía Geotérmica” [8]

- En 1979-1980, INGEMMET y AQUATER de Italia efectuaron estudios de reconocimiento geotérmico de la Región V, identificando las áreas de interés Tutupaca, Calacoa, Challapalca, Salinas, Chachani y Chivay.
- En 1980, Geothermal Energy System Ltd. hizo estudios de reconocimiento geotérmico de las zonas de Calacoa, Tutupaca y las Salinas en Moquegua.

- En el año 1986, ELECTROPERÚ con asistencia técnica de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) y las Naciones Unidas realizaron investigaciones geoquímicas en la Región V, entre Tacna y Moquegua.
- En 1997, CENERGÍA con el apoyo del IIE de México efectuó la evaluación de la información, estudios disponibles, realizados por INGEMMET, ELECTROPERU, CENERGÍA, Proyecto Especial Tacna, IPEN y la Cooperación Internacional.

El Perú tiene 186 zonas geotérmicas identificadas (39% en Sudamérica)². El territorio peruano forma parte del denominado Círculo de Fuego del Pacífico, caracterizado por la ocurrencia de movimientos sísmicos, fenómenos tectónicos y elevada concentración de flujo tectónico. En el país se han reconocido más de doscientas vertientes de agua caliente, así como fumarolas y algunos geysers.

Según los estudio realizados, de acuerdo a la temperatura, las mejores perspectivas de aprovechamiento geotérmico para generación eléctrica se ubican por el momento en la Región V (Conos Volcánicos) y la Región II (Callejón de Huaylas).

Características

a) Región V

- Calacoa (Moquegua)

Manantiales de agua termales 54°C - 87°C y presencia de geysers y fumarolas.

Tipo de aguas : Cloruradas sódicas.

Geotermometría: SiO₂: 110°C-160°C, Na/K : 180°C-190°C

Presencia de domos, volcán Ticsani (apagado) 190000 años.

² Fuente: “Megadiversidad del Perú”, Perú ecológico. Página web:
<http://www.peruecologico.com.pe/megadiversidad.htm>

- Tutupaca (Tacna-Moquegua)

Manantiales de agua termales 40°C - 87°C y presencia de geysers.

Tipo de aguas: Sulfato sódicas y cálcicas.

Geotermometría: SiO₂: 180°C, Na/K : 240°C.

Presencia de domos dacíticos y fumarolas lo relacionan con una actividad freato-magmática. Ubicado entre volcanes Tutupaca y Yuramane (apagado).

- Challapalca (Tacna-Puno)

Manantiales de agua termales 50°C - 87°C

Tipo de aguas: Clorurada sódicas y bóricas.

Geotermometría: SiO₂: 192°C, Na/K : 182°C-232°C, Na/K/Ca: 184°C-212°C, Na/K/Ca/Mg: 44°C-179°C, Na/Li: 204°C-240°C, K/Mg: 87°C-183°C.

Presencia de domos (domos Purupurini), ponen en evidencia una fuente geotermal poco profunda. Se estima que la actividad volcánica cesó hace 100000 años.

- Laguna Salinas-Chivay

Manantiales de agua termales 45°C a 50°C en Calera y de 60°C a 70 °C en Chivay, además presencia de geysers.

Tipo de aguas: Sulfato, clorurada alcalina.

Geotermometría: En Chivay SiO₂: 170°C, en Salinas Na/K : 190°C.

Presencia de domos apagados indican presencia de cámaras magmáticas poco profundas. La actividad volcánica lávica se estima cesó hace 100 000 años.

b) Región II

- La Gramma

Tipo de aguas: Clorurada sódicas y bicarbonato cálcico.

Geotermometría: SiO₂: 210°C, Na/K : 200°C, Na/K/Ca: 180°C.

- Callejón de Huaylas

Tipode aguas: Clorurada sódicasy bicarbona cálcico.

Geotermometría: SiO₂: 190°C, Na/K : 200°C, Na/K/Ca; 180°C

En la Macro región sur (Tacna, Moquegua, Arequipa), se han identificado varios campos geotermales (Figura 2.37 y 2.38), siendo los principales los siguientes:

- Campo Geotermal Andahua (Arequipa)
- Campo Geotermal Salinas (Arequipa)
- Campo Geotermal Calacoa (Moquegua)
- Campo Geotermal Aguas Calientes Candarave (Tacna)
- Campo Geotermal Borateras-Casiri, Chungara (Tacna)

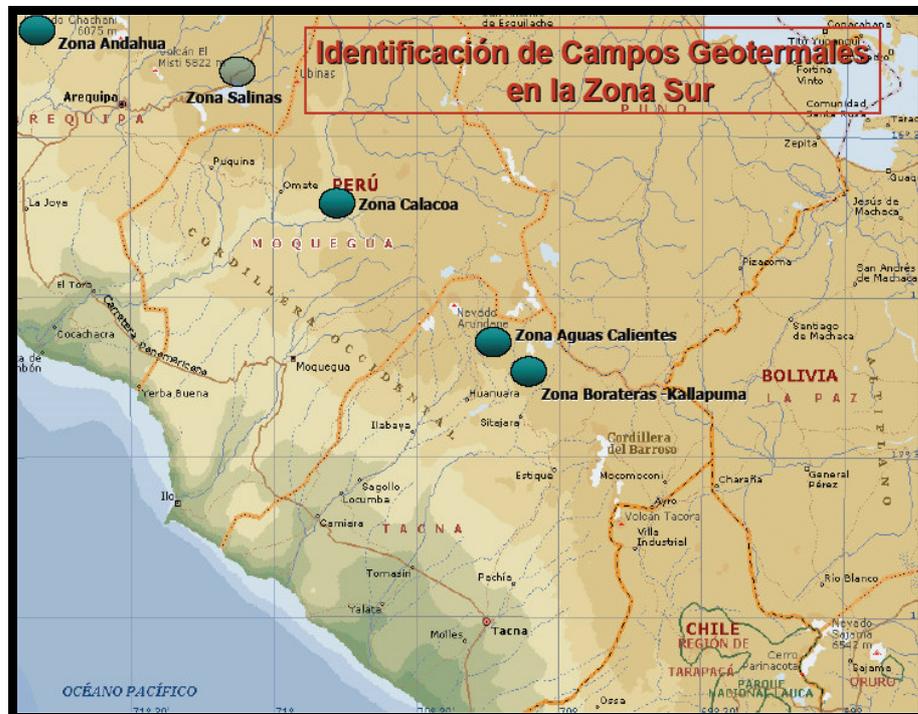


Figura 2.37 IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMPOS GEOTERMALES EN LA ZONA SUR DEL PERÚ.

“Energía Geotérmica en la Región Tacna” [5]

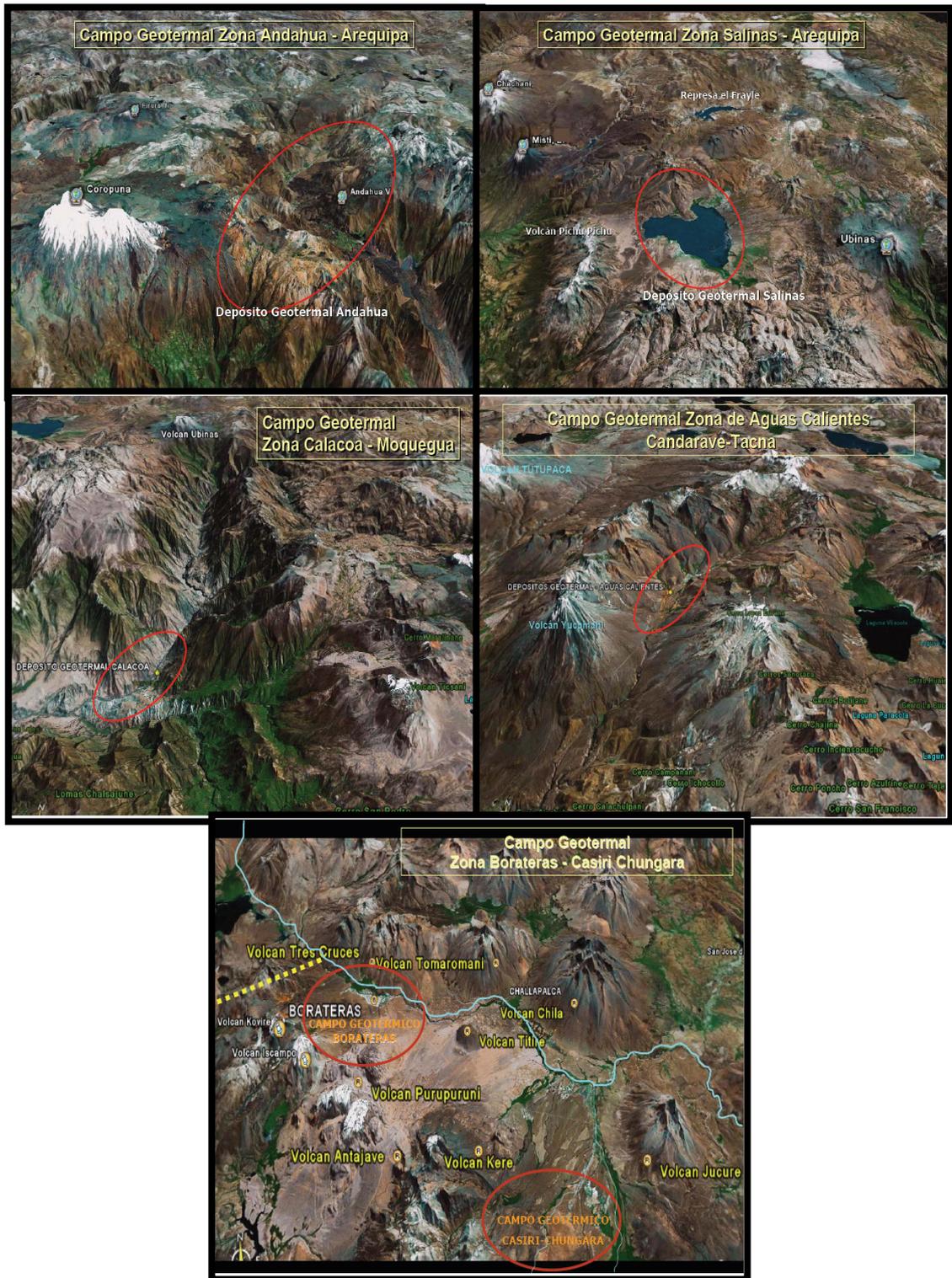


Figura 2.38 PRINCIPALES CAMPOS GEOTÉRMICOS EN LA ZONA SUR DEL PERÚ.

“Energía Geotérmica en la Región Tacna” [5]

En la Región Tacna, se tienen varios campos geotérmicos siendo uno de los más importantes el de Borateras, donde se han realizado estudios preliminares con la cooperación del Organismo Internacional de Energía Atómica –OIEA (Tabla 2.4)

RED DE CONTROL GEOTERMAL DE LA REGION TACNA											
No. DE MUESTRA	CODIGO ACTUAL/I	PUNTOS DE CONTROL	TEMPERATURA °C		CE ms/cm	TDS gr/l	pH Unidades	Hum. Relat. Amb. %	FECHA d-m-a	HORA	
			AIRE	AGUA						inicio	final
1	GT1	RIO ANCOAQUE ANTES TUNEL KOVIRE	2.6	2.5	0.16	0.06	8.34	78.8	19/02/2000	07:10	07:15
2	GT2	RIO MAURE EN CAPTACIONES VILACHALLANI	15.5	11.9	0.21	0.11	7.99	36.8	19/02/2000	10:34	10:45
3	GT3	MANANTIAL PUTINA GRANDE	13.5	71.3	0.26	0.13	5.97	38.7	20/02/2000	09:20	09:30
4	GT4	MANANTIAL PUTINA CHICO	9.5	84.5	7.36	3.68	7.30	50.1	20/02/2000	16:39	16:52
5	GT5	PUTINA CHICO FINAL DE BORATERAS	12.0	17.2	4.61	2.30	7.00	47.1	19/02/2000	12:14	12:39
6	GT6	MANANTIAL PUTINA CHICO	8.3	75.0	5.23	2.61	6.60	63.0	20/02/2000	16:16	16:36
7	GT7	POZO EXPLORACION PAMPA CHILLICOLPA	8.2	57.7	3.82	1.91	6.44	68.5	20/02/2000	14:53	15:01
8	GT8	MANANTIAL SAPIUTAPA	8.5	20.1	6.34	3.17	6.71	58.7	20/02/2000	15:17	15:25
9	GT9	MANANTIAL SAPIUTAPA	8.2	39.7	4.19	2.09	6.77	58.3	20/02/2000	15:59	16:04
10	GT10	MANANTIAL PAMPA CHILLICOLPA	10.7	42.7	4.44	2.22	6.35	60.6	20/02/2000	14:31	14:42
11	GT11	RIO MAURE ANTES BANOS CALACHACA	15.5	17.3	2.27	1.13	7.60	30.1	19/02/2000	12:58	13:16
12	GT12	RIO MAURE DESPUES BANOS CALACHACA	16.4	22.2	1.98	0.99	7.37	30.1	19/02/2000	14:05	14:49
13	GT13	MANANTIAL PUTINA CHICO	8.1	29.5	3.71	1.85	6.41	62.8	20/02/2000	15:33	15:44
14	GT14	MANANTIAL PAMPA CHILLICOLPA	8.5	25.1	5.99	2.99	7.10	59.5	20/02/2000	15:09	15:13
15	GT15	MANANTIAL BANOS CALACHACA	21.0	42.5	1.67	0.83	7.07	36.5	20/02/2000	12:21	12:32
16	GT16	MANANTIAL CALACHACA	16.5	42.2	3.20	1.60	5.71	40.5	20/02/2000	11:55	12:08
17	GT17	MANANTIAL SAMUTA	19.0	51.3	2.20	1.10	7.13	31.2	20/02/2000	12:42	12:55
18	GT18	MANANTIAL MANGUTA	18.6	10.8	0.17	0.08	7.00	33.1	20/02/2000	13:50	14:00
19	GT19	MANANTIAL TAIPIMOCO	4.3	15.1	0.21	0.11	5.89	64.1	20/02/2000	08:00	08:18
20	GT20	MANANTIAL AZUFRIHUMANI	6.5	6.6	0.43	0.21	6.23	58.5	20/02/2000	08:33	08:43
21	GT21	Qda. JUNTO PUJO (OESTE LAGUNA VILACOTA)									
22	GT22	LAGUNA VILACOTA ESTACION DE BOMBEO									
23	GT23	POZO PVL-2									
24	GT24	MANANTIAL QUIANE	18.1	38.6	4.72	2.36	6.11	31.2	17/02/2000	11:49	11:54
25	GT25	MANANTIAL CHUNGARA (DE BUENA CALIDAD)	7.8	24.2	0.33	0.16	6.80	54.1	17/02/2000	10:26	10:33
26	GT26	MANANTIAL CHUNGARA HIDROTHERMAL	13.5	74.5	5.79	2.89	6.78	46.5	17/02/2000	10:52	11:00
27	GT27	MANANTIAL JUNTO PUJO	10.5	65.3	4.58	2.29	6.82	37.2	17/02/2000	11:25	11:33
28	GT28	LAGUNA CASIRI	6.1	9.6	0.89	0.44	6.55	53.1	17/02/2000	09:38	09:45
29	GT29	MANANTIAL CASTILLA PUJO - LAGUNA CASIRI	9.5	32.6	1.85	0.92	4.43	54.1	17/02/2000	09:20	09:31
30	GT30	RIO KALLAPUMA MARGEN DERECHA	12.3	13.3	1.33	0.66	8.43	52.2	18/02/2000	16:06	16:20

Tabla 2.4 RED DE CONTROL GEOTERMAL EN LA REGIÓN TACNA

“Energía Geotérmica en la Región Tacna” [5]

En la fase de ejecución del estudio se realizaron los siguientes trabajos:

- a) Geomorfología
- b) Estratigrafía
- c) Hidrología
- d) Hidrogeoquímica
- e) Geofísica
- f) Vulcanología

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).

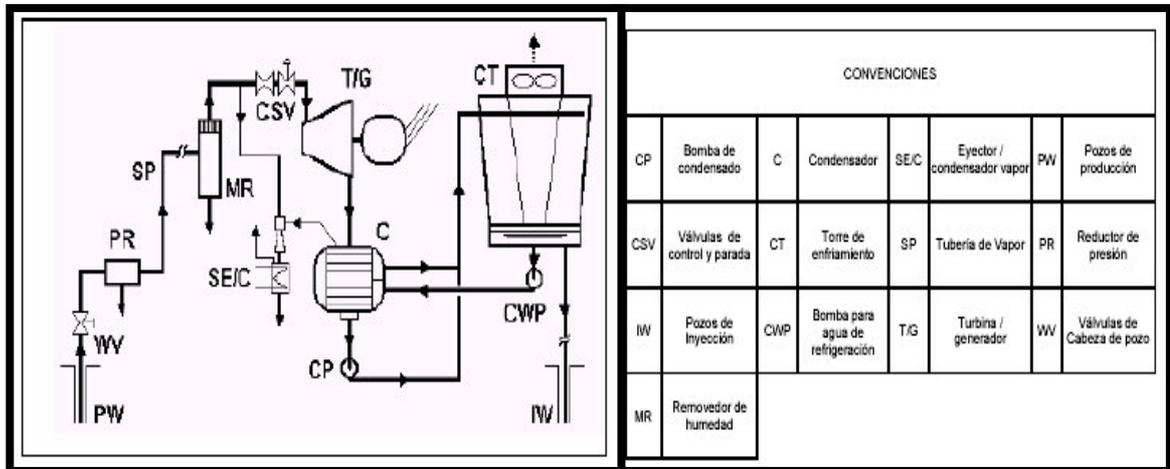


Figura 3.1 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UNA PLANTA TIPO VAPOR DIRECTO.

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

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

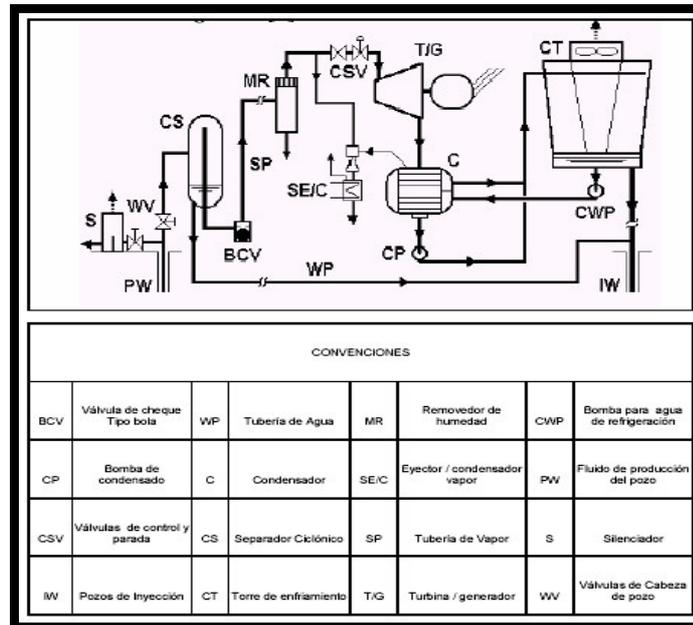


Figura 3.2 DIAGRAMA DE PLANTA TIPO SINGLE FLASH.

“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.

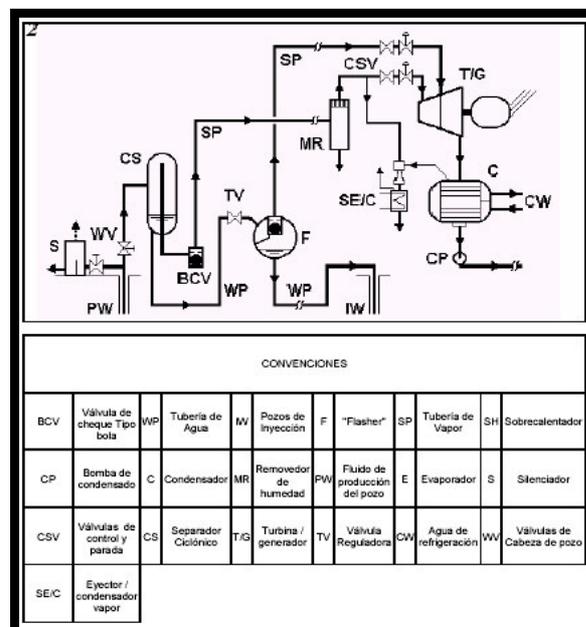


Figura 3.3 DIAGRAMA DE PLANTA TIPO DOUBLE FLASH.

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

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).

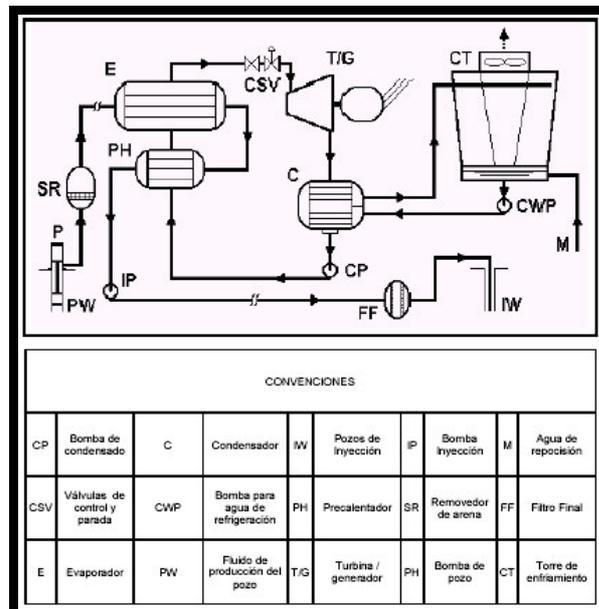


Figura 3.4 DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE PLANTA TIPO BINARIO

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

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.

Pos. Posibilidad de usar bajo ciertas circunstancias

Tabla 3.1 EQUIPOS PRINCIPALES EN PLANTAS GEOTÉRMICAS.

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

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 (η_{th}) para plantas convencionales no se aplica.

La eficiencia del ciclo térmico (η_{th}) 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:

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

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

\dot{W} = Potencia eléctrica entregada a la red, W.

\dot{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, Unidad 2	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:			
Presión 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 vacío	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” [7]

	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” [7]

3.2. Marco Legal Nacional

El mercado eléctrico peruano se rige con las siguientes leyes:

D.L. N° 28544 Ley de Concesiones Eléctricas

D.S. N° 009-93 Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas

Ley N° 26734 Ley de Creación del Osinerg

Ley N° 26876 Ley Antimonopolio y Antioligopolio.

D.S. N° 020-97-EM Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.

Las leyes que contemplan el reconocimiento, exploración y explotación de los recursos geotérmicos son:

- a) La Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos.
- b) Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos.

a) Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos

La Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, Ley N° 26848, fue promulgada el 29 de febrero de 1997 y norma lo relativo al aprovechamiento de los recursos geotérmicos del suelo y del subsuelo del territorio nacional. El marco legal favorece a la inversión privada, teniendo en cuenta que nuestro país posee alrededor de 300 manifestaciones de aguas termales entre 49°C y 89°C, situadas a lo largo de la Cordillera Occidental y en menor proporción en los valles interandinos y la zona oriental.

A través de esta ley el Estado promueve el racional desarrollo de los recursos geotérmicos con la finalidad de asegurar el abastecimiento de energía necesaria para el crecimiento económico, el bienestar de la población y la eficiente diversificación de las fuentes de energía del país y cautela el desarrollo de las referidas actividades, su acceso y libre competencia, de acuerdo a ley.

El Ministerio de Energía y Minas, en representación del Estado, es el encargado de elaborar, proponer y aplicar la política del sub-sector, así como dictar las demás normas pertinentes.

El Organismo Supervisor de Inversión en Energía (OSINERG) es el encargado de velar por el cumplimiento de la presente Ley.

El aprovechamiento de los recursos se otorga a través de derechos geotérmicos, bajo las modalidades de autorización y concesión, cuyo otorgamiento obliga a su trabajo, que consiste primordialmente es el cumplimiento de programas de trabajo y de compromisos de inversión. La concesión de recursos geotérmicos es un bien inmueble y otorga a su titular un derecho real sujeto a la presente ley.

En esta ley se contemplan como actividades geotérmicas las de reconocimiento, exploración y explotación de recursos geotérmicos.

b) Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos

El Ministerio de Energía y Minas reglamenta la ley arriba mencionada a través del Decreto Supremo N° 072-2006-EM, que entró en vigencia a partir del 24 de diciembre del 2006, en el cual se regula el régimen tributario a aplicar dentro del marco de garantías de promoción a la inversión.

El reglamento consta de 8 títulos, los cuales tratan sobre las actividades geotérmicas, derechos geotérmicos, derechos y obligaciones de los titulares, extinción de los derechos geotérmicos, jurisdicción administrativa, procedimientos, protección ambiental y las garantías de la promoción a la inversión.

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.

4.1.3. Consideraciones Ambientales

- La planta estará ubicada en el campo geotérmico de Borateras que tiene forma rectangular de 25 x 10 km., totalizando 250 km², se ubica en el altiplano de Tacna vecino a la cordillera occidental sobre los 4200 m.s.n.m; políticamente se encuentra en el Distrito de Sitajara, Provincia de Tarata, Departamento de Tacna (Figuras 4.1 y 4.2)
- Este campo geotermal está ubicado en las pampas adyacentes al cauce del río Maure, donde las manifestaciones geotermales contaminan con boro y arsénico y otros elementos químicos el agua superficial que discurre por dicho río.
- Se tiene acceso al lote geotérmico a través de trocha carrozable (Figura 4.3).
- Tiene acceso a una línea de transmisión de 33 kV que se dirige a la subestación de Tarata (Figura 4.4)
- Presencia de manantiales de agua termales, geysers y fumarolas.



Figura 4.1 VISTA PANORÁMICA CAMPO GEOTÉRMICO DE BORATERAS
 “Energía Geotérmica en la Región Tacna” [5]

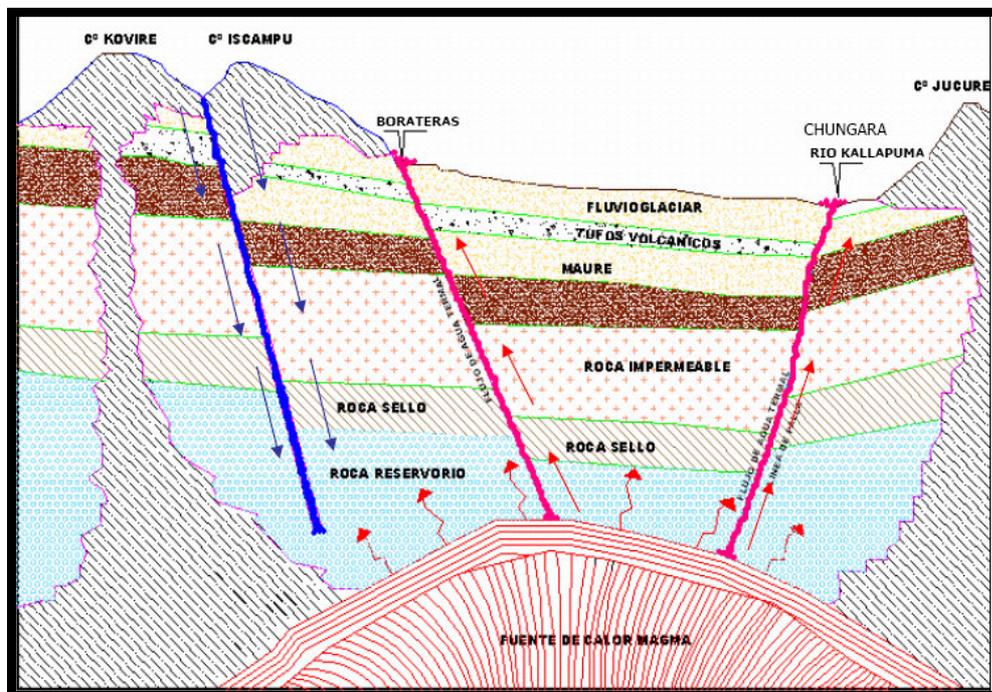


Figura 4.2 ESQUEMA DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE BORATERAS
 “Energía Geotérmica en la Región Tacna” [5]

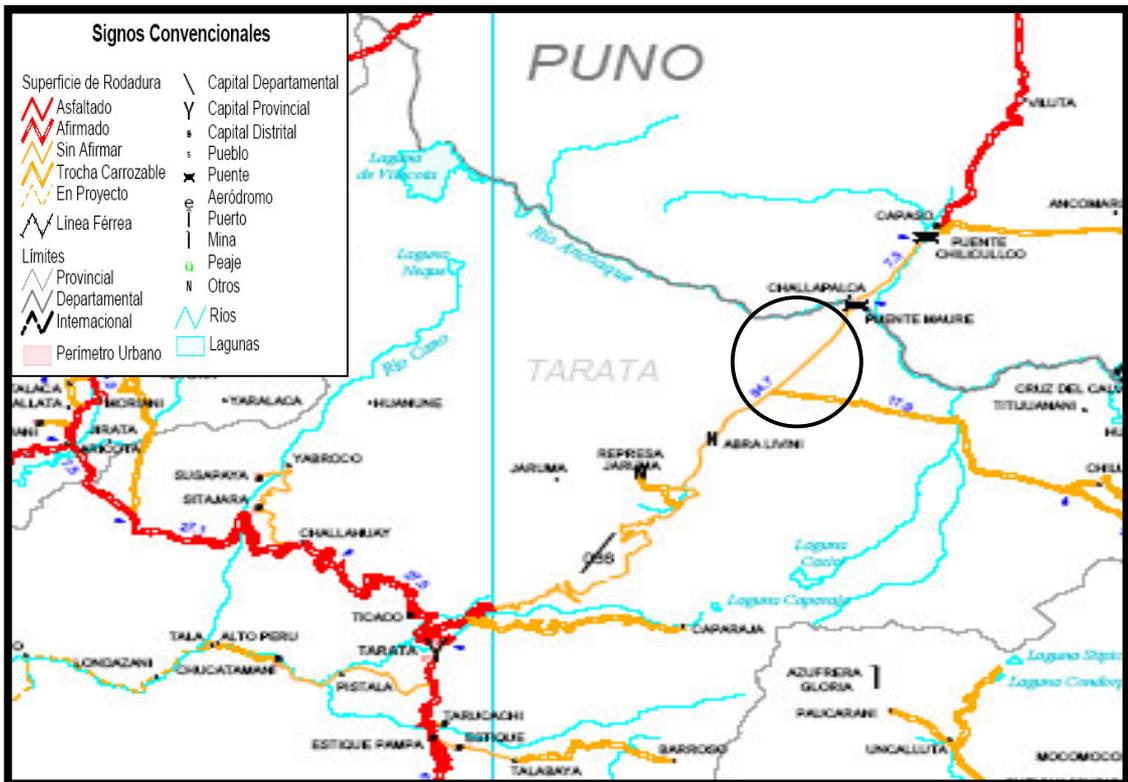


Figura 4.3 UBICACIÓN DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE BORATERAS EN EL MAPA VIAL DEL DEPARTAMENTO DE TACNA

“Tacna – Mapa Vial” [30]

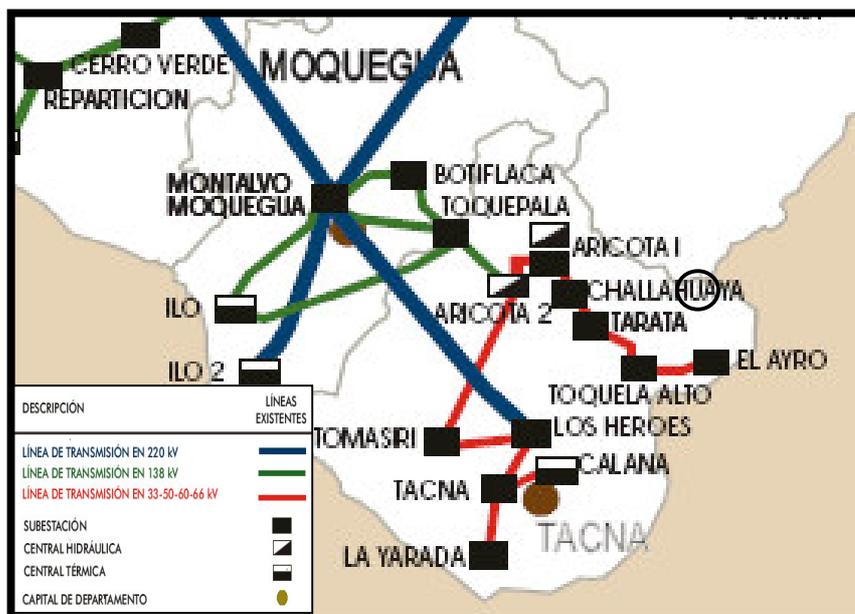


Figura 4.4 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CERCA DE BORATERAS

“Mapa de Líneas de Transmisión” [30]

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,

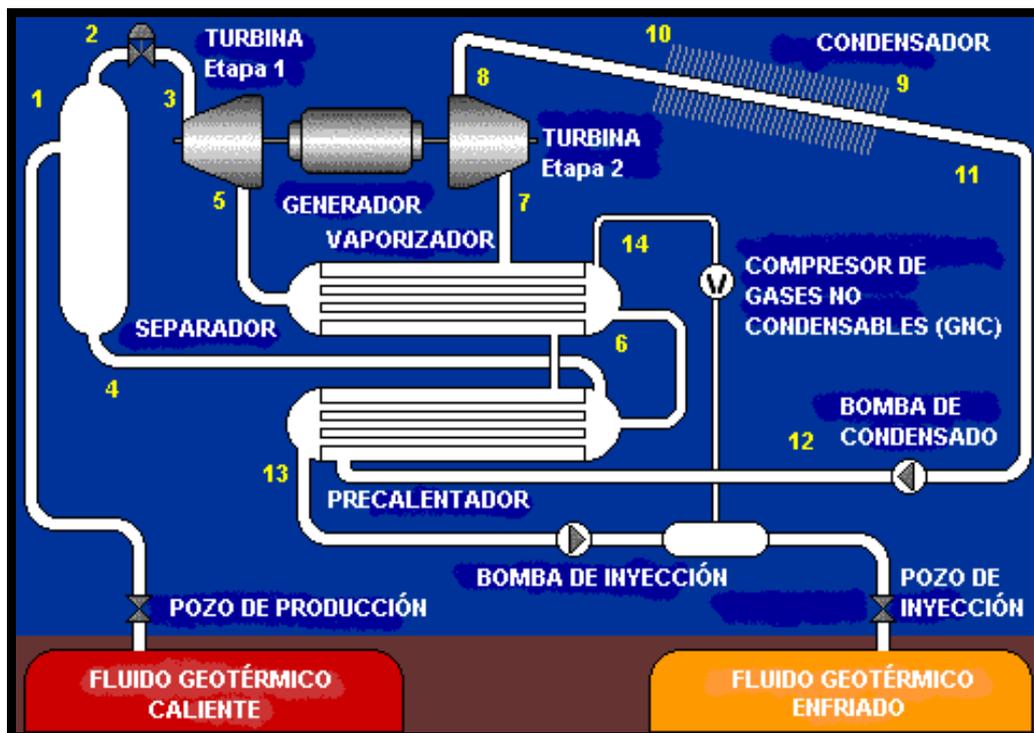


Figura 4.5 ESQUEMA DE LA PLANTA GEOTÉRMICA DE 50 MW

“The Basics of Geothermal Power Conversion” [32]

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:

$$\dot{W}_{t1} = (h_3 - h_{5r}) \cdot \dot{m}_3 \cdot \eta_t$$

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 (Re_{x_b}) se obtiene la presión después de la bomba.

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

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:

$$\dot{W}_e = \dot{W}_{e_1} + \dot{W}_{e_2}$$

\dot{W}_{e_1} = Potencia eléctrica generada en la primera etapa de la turbina, kW.

\dot{W}_{e_2} = Potencia eléctrica generada en la segunda etapa de la turbina, kW.

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:

$$\dot{W}_{e_1} = \dot{W}_{t_1} \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$\dot{W}_{e_1} = (h_3 - h_{5r}) \cdot \dot{m}_3 \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

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

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{W}_{e_1} (h_2 - h_4)}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g (h_1 - h_4) (h_3 - h_{5r})}$$

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:

$$\dot{W}_{e_2} = \dot{W}_{t_2} \cdot \eta_m \cdot \eta_g = (h_7 - h_{8r}) \cdot \dot{m}_7 \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$\dot{m}_7 = \frac{\dot{W}_{e_2}}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g (h_7 - h_{8r})}$$

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.

\dot{m} = Flujo de masa, kg/s.

h = Entalpía del fluido, kJ/kg.

K = 1839000, sin unidades.

P_c = 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:

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

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:

$$\eta_{SF} = \frac{\dot{W}_{e1}}{\dot{m}_3 \cdot h_3} \qquad \eta_{BP} = \frac{\dot{W}_{e2}}{\dot{m}_7 \cdot h_7}$$

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.

4.3. Resultados

4.3.1. Ciclo Termodinámico

Para el diseño de la planta geotérmica de la Figura 4.5 se establecen algunos parámetros iniciales como conocidos, los cuales se muestran en la Tabla 4.2.

PARÁMETROS INICIALES DEL DISEÑO		
h_1	1100 kJ/kg	Entalpía del fluido geotérmico.
P_1	2000 kPa	Presión del fluido geotérmico.
Rex_{val}	1.1	Relación de expansión de la válvula de regulación.
P_5	200 kPa	Presión de salida en la primera etapa de la turbina.
η_{at}	97%	Eficiencia adiabática de la turbina de dos etapas.
P_{11}	100 kPa	Presión de ingreso en la bomba de condensado.
Rex_b	10	Relación de expansión de la bomba de condensado.
η_{ab}	97%	Eficiencia adiabática de la bomba de condensado.
ΔP_p	100 kPa	Pérdida de presión en el precalentador.
T_7	150 °C	Temperatura de sobrecalentamiento en el vaporizador.
ΔP_v	100 kPa	Pérdida de presión en el vaporizador.
P_8	100 kPa	Presión de salida en la segunda etapa de la turbina.
ΔP_c	50 kPa	Pérdida de presión en el condensador.
η_b	90%	Eficiencia de la bomba de condensado.
η_t	88%	Eficiencia de la turbina.
η_m	87%	Eficiencia mecánica.
η_g	96%	Eficiencia del generador.
We_1	25000 kW	Potencia eléctrica generada en la primera etapa de la turbina.
We_2	25000 kW	Potencia eléctrica generada en la segunda etapa de la turbina.
T_9	25 °C	Temperatura del agua refrigerante.
P_9	100 kPa	Presión del agua refrigerante.
m_9	600 kg/s	Flujo de masa del agua refrigerante.

Tabla 4.2 PARÁMETROS INICIALES DEL DISEÑO

Con los parámetros iniciales definidos en la Tabla 4.2 se pueden conocer y calcular todos los parámetros de todos los puntos de la planta geotérmica que se muestra en la Figura 4.5, a continuación se muestran los cálculos y los resultados del ciclo termodinámico.

a) En el separador

En el punto 1 la entalpía y la presión del flujo geotérmico son conocidas, entonces de tablas termodinámicas se determinan los otros parámetros.

$$h_1 = 1100 \text{ kJ/kg}, P_1 = 2000 \text{ kPa}, s_1 = 2.8410 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_1 = 212.40 \text{ }^\circ\text{C}$$

El fluido geotérmico es separado en vapor (punto 2) y líquido (punto 4), entonces la calidad queda definida como:

$$x_2 = 1, x_4 = 0$$

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

$$T_2 = T_1 = T_4 = 212.40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

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

$$P_2 = P_1 = P_4 = 2000 \text{ kPa}$$

La entalpía y la entropía del vapor es determinada como la entalpía del vapor saturado con la presión P_2 .

$$h_2 = 2799 \text{ kJ/kg}, s_2 = 6.34 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Igualmente, la entalpía del líquido como la del líquido saturado con la presión P_4 .

$$h_4 = 908.6 \text{ kJ/kg}, s_4 = 2.4470 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Del equilibrio térmico se obtiene:

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

$$x_1 = \frac{1100 - 908.6}{2799 - 1100}$$

$$x_1 = 0.1013$$

b) En la Válvula de regulación

Esta válvula produce pérdidas debido al estrangulamiento del vapor antes de ingresar a la turbina.

$$P_3 = \frac{P_2}{R_e \times v} = \frac{2000}{1.1} = 1818.18 \text{ kPa}$$

El fluido como vapor saturado es expandido isoentálpicamente en la válvula de regulación.

$$h_3 = h_2 = 2799 \text{ kJ/kg}$$

Con la presión y la entalpía se pueden calcular todos los demás parámetros.

$$T_3 = 208.5 \text{ }^\circ\text{C}, s_3 = 6.3790 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

c) En 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:

$$s_{5i} = s_3 = 6.3790 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Con la presión después de la turbina ($P_5 = 200 \text{ kPa}$) y s_{5i} conocido, se conocen la entalpía ideal del fluido.

$$h_{5i} = 2412 \text{ kJ/kg}$$

Luego se corrige la entalpía con la eficiencia adiabática ($\eta_{at} = 97\%$)

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

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

$$h_{5r} = 2799 - 0.97(2799 - 2412)$$

$$h_{5r} = 2423.61 \text{ kJ/kg}$$

Después de la turbina, con la entalpía y la presión del fluido conocidas, se conocen los otros parámetros.

$$s_{5r} = 6.4080 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_{5r} = 120.20 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Flujos de masa del fluido geotérmico

De la ecuación obtenida para el cálculo del flujo de masa (pág. 86):

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{W}e_1 (h_2 - h_4)}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g (h_1 - h_4)(h_3 - h_{5r})}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{25000(2799 - 908.60)}{(0.88)(0.87)(0.96)(1100 - 908.60)(2799 - 2423.61)}$$

$$\dot{m}_1 = 894.94 \text{ kg / s}$$

$$\dot{m}_2 = x_1 \cdot \dot{m}_1 = 0.1013(894.94) = 90.66 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_4 = (1 - x_1) \cdot \dot{m}_1 = (1 - 0.1013)(894.94) = 804.29 \text{ kg / s}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 = 90.66 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3 = 90.66 \text{ kg/s}$$

e) En la Bomba de Condensado

La presión antes de la bomba es conocida ($P_{11} = 100 \text{ kPa}$), 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 determinados.

$$h_{11} = -344.40 \text{ kJ/kg}, s_{11} = -1.6710 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_{11} = 27.48 \text{ }^\circ\text{C}$$

La bomba de condensado eleva la presión del isopentano para su ingreso al precalentador. Conociendo la relación de expansión de la bomba ($Re_{x_b} = 10$) se obtiene la presión después de la bomba.

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

$$P_{12} = 1000 \text{ kPa}$$

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

$$s_{12i} = s_{11} = -1.6710 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Con la entropía y la presión conocidas se puede calcular la entalpía ideal del fluido después de la bomba.

$$h_{12i} = -342.90 \text{ kJ/kg}$$

Luego se corrige la entalpía considerando una eficiencia adiabática ($\eta_{ab} = 97\%$)

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

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

$$h_{12r} = -344.40 + \frac{(-342.90 - (-344.90))}{0.97}$$

$$h_{12r} = -342.85 \text{ kJ/kg}$$

Con la presión y la entalpía se pueden calcular los otros parámetros después de la bomba.

$$s_{12r} = -1.6710 \text{ kJ/kg}, T_{12r} = 27.84 \text{ }^\circ\text{C}$$

f) En el Precalentador

La entalpía del fluido geotérmico antes del precalentador ($h_4 = 908.60 \text{ kJ/kg}$) y la entalpía del isopentano después de la bomba ($h_{12r} = -342.85 \text{ kJ/kg}$) 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:

$$P_6 = P_{12} = 1000 \text{ kPa}$$

Por lo tanto, todos los parámetros del isopentano después del precalentador pueden ser determinados.

$$h_6 = 134.20 \text{ kJ/kg}, s_6 = -0.3706 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_6 = 115.80 \text{ }^\circ\text{C}$$

g) En el Vaporizador

La entalpía del fluido geotérmico antes del vaporizador ($h_{5r} = 2423.61 \text{ kJ/kg}$) y la entalpía del isopentano después del precalentador ($h_6 = 134.20 \text{ kJ/kg}$) son conocidas. La temperatura de sobrecalentamiento es conocida ($T_7 = 150^\circ\text{C}$) y la presión es igual a la de la salida del precalentador, es decir:

$$P_7 = P_6 = 1000 \text{ kPa}$$

Por lo tanto, todos los parámetros del isopentano después del vaporizador pueden ser calculados.

$$h_7 = 218.40 \text{ kJ/kg}, s_7 = -0.1633 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

h) En 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:

$$s_{8i} = s_7 = -0.1633 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

Con una presión fijada después de la turbina ($P_8 = 100 \text{ kPa}$) y s_{8i} conocido, la entalpía ideal del fluido después de la turbina puede ser determinada.

$$h_{8i} = 121 \text{ kJ/kg}$$

Luego se corrige la entalpía considerando una eficiencia adiabática ($\eta_{at} = 97\%$).

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

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

$$h_{8r} = 218.40 - 0.97(218.40 - 121)$$

$$h_{8r} = 123.92 \text{ kJ/kg}$$

i) Flujos de masa del isopentano

De la ecuación obtenida para el cálculo del flujo de masa (pág. 86):

$$\dot{m}_7 = \frac{\dot{W}e_2}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g (h_7 - h_{8r})}$$

$$\dot{m}_7 = \frac{25000}{(0.88)(0.87)(0.96)(218.4 - 123.92)}$$

$$\dot{m}_7 = 360.03 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{12} = 360.03 \text{ kg/s}$$

j) Fluidos reinyectados

Usando la ecuación de balance de calor, la entalpía del fluido geotérmico a reinyectar después del precalentador puede ser calculada como:

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

$$h_{13} = \frac{908.60(804.29) - (134.20 - (-342.85)) \cdot 360.03}{804.29}$$

$$h_{13} = 695.05$$

La presión del fluido geotérmico antes y después del precalentador son casi las mismas. Conocida la pérdida de presión ($\Delta P_p = 100 \text{ kPa}$), se calcula la presión del fluido a reinyectar.

$$P_{13} = P_4 - \Delta P_p = 2000 - 100 = 1900 \text{ kPa}$$

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

$$s_{13} = 1.9840 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_{13} = 164.30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Usando la ecuación de balance de calor, la entalpía del fluido geotérmico a reinyectar después del vaporizador 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 ($\Delta P_v = 100$ kPa), se calcula la presión del fluido a reinyectar.

$$P_{14} = P_5 - \Delta P_v = 200 - 100 = 100 \text{ kPa}$$

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

$$s_{14} = 5.7870 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_{14} = 99.61 \text{ }^\circ\text{C}$$

k) En el Condensador

Para el ingreso del agua refrigerante, la presión ($P_9 = 100$ kPa) y la temperatura ($T_9 = 25^\circ\text{C}$) son conocidas, con los que se pueden calcular los otros parámetros:

$$h_9 = 104.80 \text{ kJ/kg}, s_9 = 0.3669 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

La pérdida de presión del agua refrigerante en el condensador no es alta ($\Delta P_c = 50$ kPa), entonces:

$$P_{10} = P_9 - \Delta P_c = 100 - 50 = 50 \text{ kPa}$$

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

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = 600 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_{11} = 360.03 \text{ kg/s}$$

Para calcular los parámetros del agua refrigerante a la salida del condensador se debe calcular la entalpía. De la siguiente ecuación:

$$h_{10} = \frac{\dot{m}_g \cdot h_g + \dot{m}_s (h_{sr} - h_{11})}{\dot{m}_g}$$

$$h_{10} = \frac{600(104.8) + 360.03(123.92 - (-344.40))}{600}$$

$$h_{10} = 385.81 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{10} = 1.2190 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_{10} = 81.31^\circ\text{C}$$

El resumen de los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3 y los diagramas T-S del flujo geotérmico (Figura 4.6) y del isopentano (Figura 4.7).

PUNTO N°	h (kJ/kg)	P (kPa)	s (kJ/kg °C)	T (°C)	x	v (m ³ /kg)	u (kJ/Kg)	m (kg/s)
1	1100.00	2000.00	2.8410	212.40	0.10	0.0111	1078.00	894.94
2	2799.00	2000.00	6.3400	212.40	1.00	0.0996	2599.00	90.66
3	2799.00	1818.18	6.3790	208.50	-	0.1096	2600.00	90.66
4	908.60	2000.00	2.4470	212.40	0.00	0.0012	906.30	804.29
5i	2412.00	200.00	6.3790	120.20	0.87	0.7681	2258.00	90.66
5r	2423.61	200.00	6.4080	120.20	0.87	0.7727	2269.00	90.66
6	134.20	1000.00	-0.3706	115.80	1.00	0.0348	99.44	360.03
7	218.40	1000.00	-0.1633	150.00	-	0.0413	177.00	360.03
8i	121.00	100.00	-0.1633	93.52	-	0.4134	79.62	360.03
8r	123.92	100.00	-0.1552	95.00	-	0.4152	82.40	360.03
11	-344.40	100.00	-1.6710	27.48	0.00	0.0016	-344.60	360.03
12i	-342.90	1000.00	-1.6710	27.84	-	0.0016	-344.50	360.03
12r	-342.85	1000.00	-1.6710	27.84	-	0.0016	-344.50	360.03
13	695.05	1900.00	1.9840	164.30	-	0.0011	692.90	804.29
14	2089.23	100.00	5.7870	99.61	0.74	1.2560	1964.00	90.66
9	104.80	100.00	0.3669	25.00	-	0.0010	104.70	600.00
10	385.81	50.00	1.2190	81.31	0.02	0.0649	382.60	600.00

Tabla 4.3 RESULTADOS DE TODOS LOS PARÁMETROS EN LA PLANTA GEOTÉRMICA DE 50 MW.

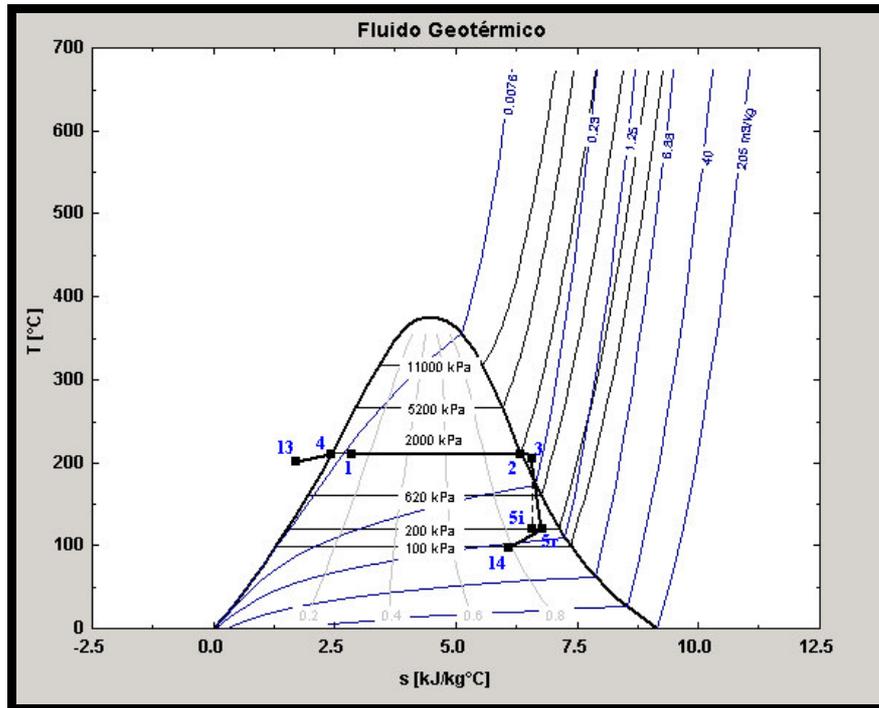


Figura 4.6 DIAGRAMA T-S DEL FLUIDO GEOTÉRMICO

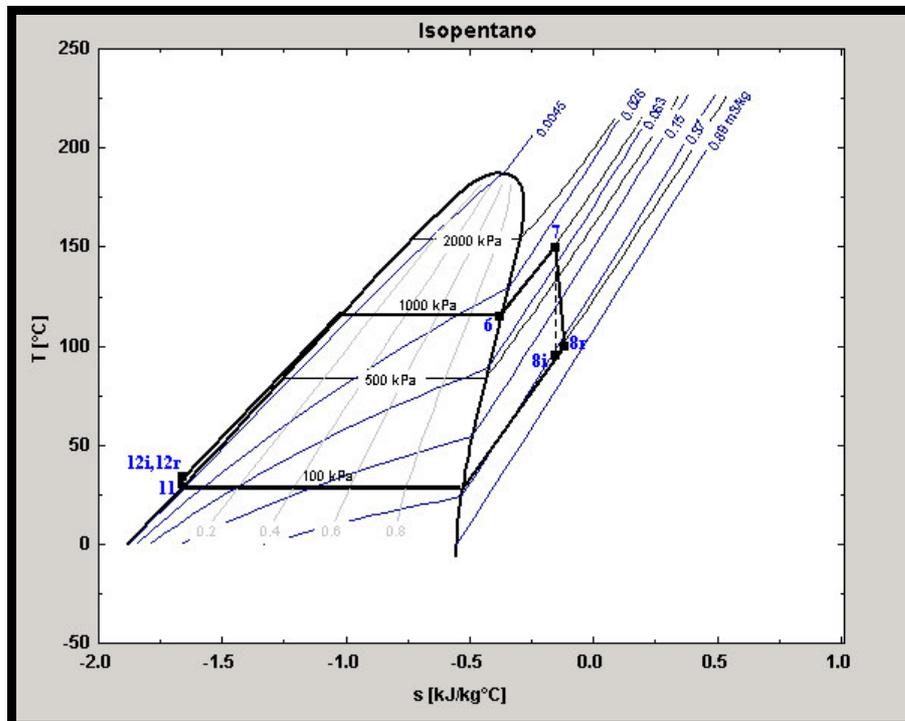


Figura 4.7 DIAGRAMA T-S DEL ISOPENTANO

Potencia de la bomba de condensado

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

$$\dot{W}_b = \frac{360.03(0.0016)(1000 - 100)}{0.9}$$

$$\boxed{\dot{W}_b = 588.29 \text{ kW}}$$

Potencia de la turbina

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

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

$$\dot{W}_{t_1} = (2799 - 2423.61)(90.66)(0.88)$$

$$\dot{W}_{t_2} = (218.4 - 123.92)(360.03)(0.88)$$

$$\boxed{\dot{W}_{t_1} = 29948.20 \text{ kW}}$$

$$\boxed{\dot{W}_{t_2} = 29932.95 \text{ kW}}$$

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{t_1} + \dot{W}_{t_2}$$

$$\dot{W}_t = 29948.20 + 29932.95$$

$$\boxed{\dot{W}_t = 59881.15 \text{ kW}}$$

Calor transferido en el precalentador

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

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

$$\boxed{\dot{q}_{hp} = \dot{q}_{cp} = 171752.61 \text{ kW}}$$

Calor transferido en el vaporizador

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

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

$$\dot{q}_{hv} = 90.66(2423.61 - 2089.23)$$

$$\dot{q}_{cv} = 360.03(218.4 - 134.2)$$

$$\boxed{\dot{q}_{hv} = \dot{q}_{cv} = 30314.35 \text{ kW}}$$

Eficiencia de la planta

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

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

$$\eta_p = \frac{50000}{(90.66)(2799) + (360.03)(218.40)}$$

$\eta_p = 15.04 \%$

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:

$$\eta_{SF} = \frac{\dot{W}_{e1}}{\dot{m}_3 \cdot h_3} \qquad \eta_{BP} = \frac{\dot{W}_{e2}}{\dot{m}_7 \cdot h_7}$$

$$\eta_{SF} = \frac{25000}{(90.66)(2799)} \qquad \eta_{BP} = \frac{25000}{(360.03)(218.40)}$$

$\eta_{SF} = 9.85 \%$

$\eta_{BP} = 31.79 \%$

De los resultados obtenidos podemos apreciar que 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. Se puede incrementar la eficiencia de la planta utilizando un separador adicional como el utilizado en la planta tipo Double Flash, siendo inevitable obtener un flujo de fluido geotermal residual.

4.3.2. Selección de componentes

a) Pozos de producción y reinyección

De acuerdo al flujo de masa calculado para el fluido geotérmico ($m_1 = 894.94$ kg/s), de acuerdo a plantas geotérmicas de referencias³, un pozo geotérmico puede producir 200 kg/s, entonces los pozos requeridos son 5 para producción y 1 para reinyección, esta relación se sustenta en la cantidad de volumen existente entre el estado de vapor y líquido del agua extraída. Las cubiertas de los pozos se fabrican de cemento mezclado con sílice, perlita y retardadores como aditivos.

b) Sistema de tuberías

En la figura 4.8 se muestra la vista de planta de la planta geotérmica.

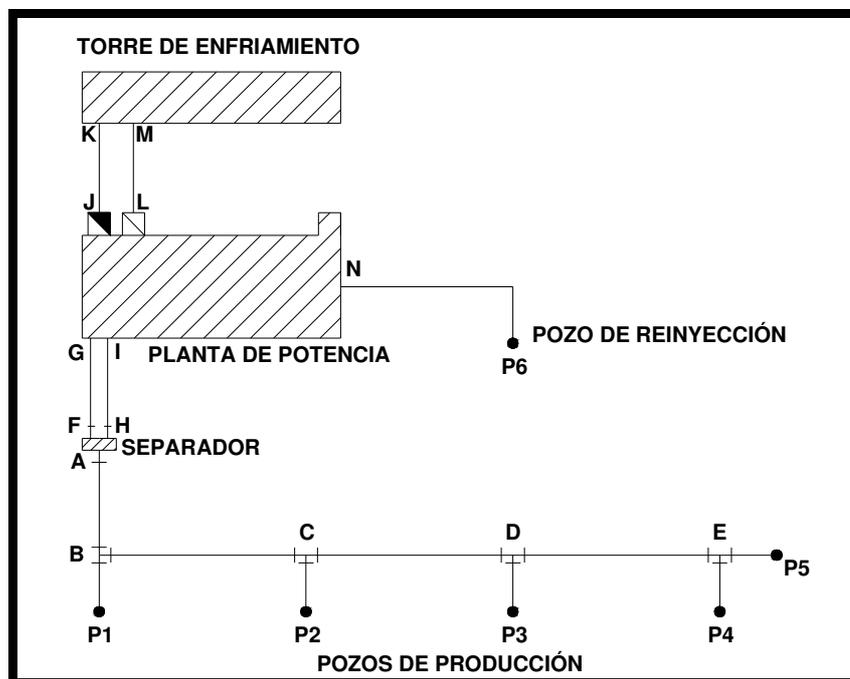


Figura 4.8 VISTA DE PLANTA DE LA PLANTA GEOTÉRMICA

³ “Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicación de Energías Alternativas y Difusión” [7]

Las tuberías seleccionadas son de acero al carbono para el transporte de fluido geotérmico. La proporción de corrosión sigue una ecuación parabólica y es aproximadamente 0.04 mm/yr cuando la tubería está enterrada. Cuando el fluido está en contacto con el aire, la proporción de corrosión es de 0.11 mm/yr; por consiguiente, se proporciona un espesor mayor a las tuberías de aireado-vapor. El peor caso ocurre en las tuberías del condensado donde la proporción de corrosión para acero del carbono es de 0.66 mm/yr, por lo que se reviste con resina epóxica⁴.

Para el tramo E-P5 se realiza un ejemplo de cálculo:

$$\dot{m}_{E-P5} = \frac{\dot{m}_1}{5} = \frac{894.94}{5} = 179 \text{ kg / s}$$

$$h_{E-P5} = h_1 = 1100 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{E-P5} = P_1 = 20 \text{ bar}$$

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

$$D_{E-P5} = \sqrt{\frac{4\dot{m}h^{1.102}}{K\pi P_C^{0.96}}}$$

$$D_{E-P5} = \sqrt{\frac{4(179)(1100)^{1.102}}{(183900)(3.1416)(20)^{0.96}}}$$

$$D_{E-P5} = 0.13\text{m}$$

En la Tabla 4.4 se muestran los diámetros obtenidos.

⁴ GEOTHERMAL POWER PLANTS OF MEXICO AND CENTRALPLANNED INSTALLATIONS AMERICA: A TECHNICAL SURVEY

TRAMO	m (kg/s)	h (kJ/kg)	Pc (bar)	D _{calculado} (m)	D _{comercial} (pulg.)	Tubería comercial
E-P5	179.00	1100.00	20.00	0.13	4.93	5"-SCH 30
E-P4	179.00	1100.00	20.00	0.13	4.93	5"-SCH 30
D-E	358.00	1100.00	20.00	0.18	6.98	7"-SCH 30
D-P3	179.00	1100.00	20.00	0.13	4.93	5"-SCH 30
C-D	537.00	1100.00	20.00	0.22	8.54	9"-SCH 30
C-P2	179.00	1100.00	20.00	0.13	4.93	5"-SCH 30
B-C	716.00	1100.00	20.00	0.25	9.87	10"-SCH 30
B-P1	179.00	1100.00	20.00	0.13	4.93	5"-SCH 30
A-B	895.00	1100.00	20.00	0.28	11.03	12"-SCH 30
F-G	90.66	2799.00	18.18	0.16	6.15	7"-SCH 30
H-I	804.29	134.20	10.00	0.12	4.58	5"-SCH 30
J-K	600.00	104.80	1.00	0.26	10.41	11"-SCH 30
L-M	600.00	104.80	1.00	0.26	10.41	11"-SCH 30
N-P6	804.29	695.05	19.00	0.21	8.32	9"-SCH 30

Tabla 4.4 DIAMETRO DE TUBERÍAS DE LA PLANTA GEOTÉRMICA

Al sistema de tuberías se adicionan las uniones necesarias, tales como codos de 90°, uniones T, válvulas, uniones de expansión y de reducción.

c) Separador, depurador y silenciador

El separador seleccionado es del tipo ciclón, donde el fluido geotérmico con las dos fases (líquido y vapor) es dirigido horizontal y tangencialmente dentro de un recipiente de presión cilíndrico vertical.

Las especificaciones son las siguientes:

Presión de operación : 2000 kPa

Temperatura : 212.40 °C

La Figura 4.9 muestra este tipo de separador.

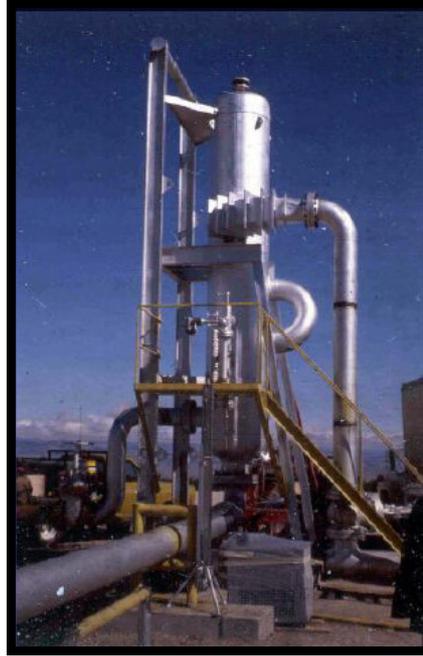


Figura 4.9 SEPARADOR TIPO CICLÓN

“The Basics of Geothermal Power Conversion” [32]

El líquido saturado se dirige circunferencialmente a lo largo de la pared interna y sale por la parte inferior. El vapor se dirige hacia arriba y se expulsa a través de una tubería de alimentación vertical.

El depurador seleccionado es del tipo corrugado, el cual se instala antes de la planta de potencia para eliminar la humedad adicional. El vapor sobrante se lanza a la atmósfera a través de una válvula de venteo.

El silenciador es de concreto con apilados de madera, se coloca cerca de la planta de potencia para reducir el nivel de ruidos del vapor lanzado (Figura 4.10).

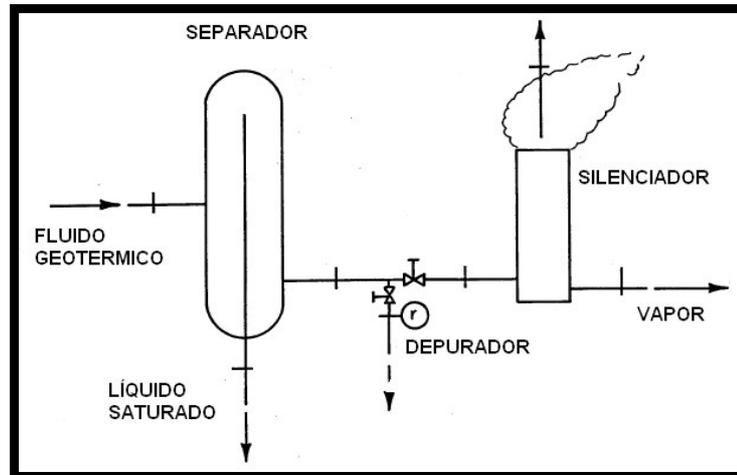


Figura 4.10 SEPARADOR, DUPARADOR Y SILENCIADOR

“The Basics of Geothermal Power Conversión” [32]

d) Precalentador y vaporizador

El precalentador y el vaporizador son intercambiadores de calor que se exponen a salmuera corrosiva, por tal motivo se ha seleccionado intercambiadores de calor de acero inoxidable (Figura 4.11)



Figura 4.11 INTERCAMIADOR DE CALOR DE ACERO INOXIDABLE

“Superchanger Plate & Frame Heat Exchangers” [29]

En el precalentador el calor se transfiere del líquido saturado que sale del separador al fluido de trabajo, que en nuestro caso es el isopentano. El agua geotérmica nunca se expone al aire y se reinyecta nuevamente dentro de la periferia del depósito. En el vaporizador el calor se transfiere del vapor geotérmico que sale de la turbina al isopentano.

e) Turbina de vapor

La turbina es de dos etapas con dos tipos de flujos. Las especificaciones son las siguientes:

Potencia de salida	: 60 MW.
Presión máxima de entrada	: 20 bar.
Temperatura máxima de salida	: 210 °C.
Presión máxima de salida	: 2 bar.
Número de etapas	: 2 (2 flujos).
Velocidad	: 60 c/s

El armazón de turbina es construido de una capa y se compone de dos bloques en la dirección axial: la parte delantera y posterior. La mitad de la cubierta superior se arma como un bloque, empernado en el borde común vertical de la parte delantera y posterior, se ensambla con la mitad superior del receptáculo fijo y/o con los anillos fijos de la lámina, para disminuir el esfuerzo en el lugar de trabajo. La mitad inferior también es diseñada como un bloque. La cubierta es apoyada directamente por la base en ambos lados del extractor. Los pedestales del cojinete son independientes de la cubierta y están fijados directamente en la base. Esta construcción asegura la estabilidad de la vibración del rotor de la turbina debido al gran momento de inercia.

Como la turbina está compuesta de álabes de reacción, el rotor de la turbina tiene un tambor o una configuración plana. La concentración de la tensión y la deposición de componentes corrosivos son eliminadas por la configuración plana, para evitar la posibilidad de agrietarse. El rotor tiene una longitud más grande para el uso geotérmico, su diámetro máximo es bastante grande y las tensiones en los bordes de las láminas son altas. Los álabes de las turbinas de vapor geotérmicas son todas del tipo de reacción, las cuales son muy eficientes y confiables.

El rotor de la turbina se fabrica de acero con aleación de Cr y Mo, maquinada para formar una unidad sólida integrada por ejes, ruedas, soportes y dos cojinetes. Los aceros de aleación que contienen Ni no se utilizan debido a su poca resistencia a la corrosión. Los álabes de la turbina son maquinadas a partir de planchas de acero con aleación del Cr; las cuales son tapadas con una cubierta que es remachada a mano en vez de sujetarla a los bordes externos de las láminas. Las parte externa del inyector es hecha de acero con aleación de Al y Cr, y las partes internas están hechas de acero con aleación de Cr. Las cubiertas externa e interna de la turbina se fabrican de acero al carbono según la especificación ASTM-A285 (Figura 4.12).

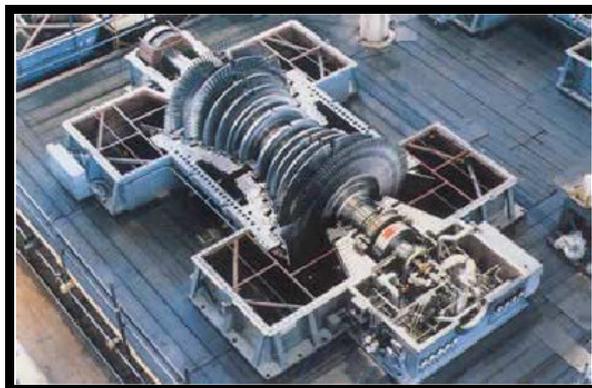


Figura 4.12 TURBINA DE VAPOR DE DOS ETAPAS

“Upgrading an Life Extensión Technologies for Geothermal Steam Turbines” [34]

En las Figuras 4.13 y 4.14 se muestra una vista global y una vista de sección longitudinal de la turbina de vapor de dos etapas.

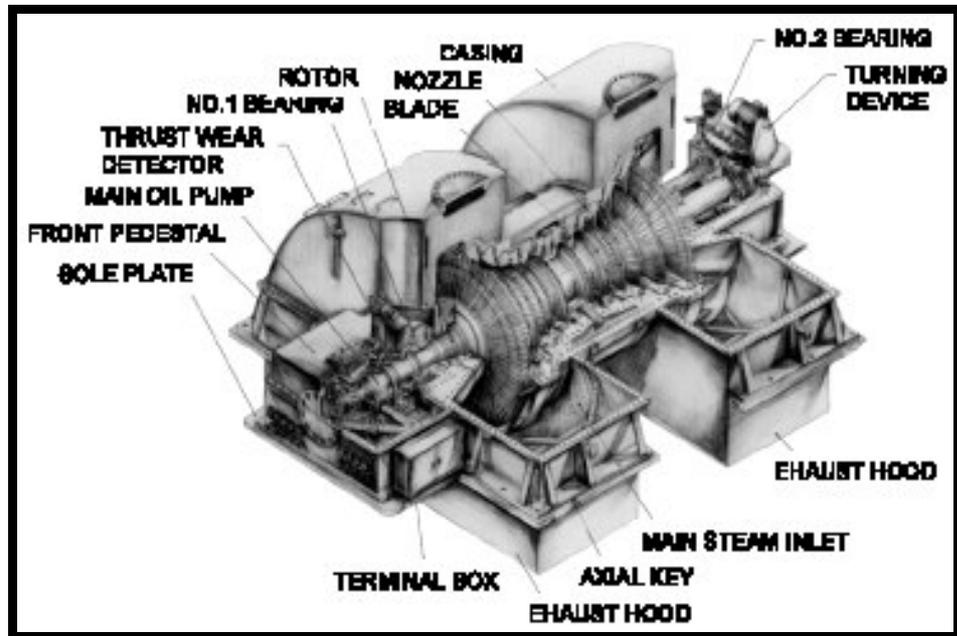


Figura 4.13 VISTA GLOBAL DE LA TURBINA DE VAPOR DE DOS ETAPAS
 “Upgrading an Life Extensión Technologies for Geothermal Steam Turbines” [34]

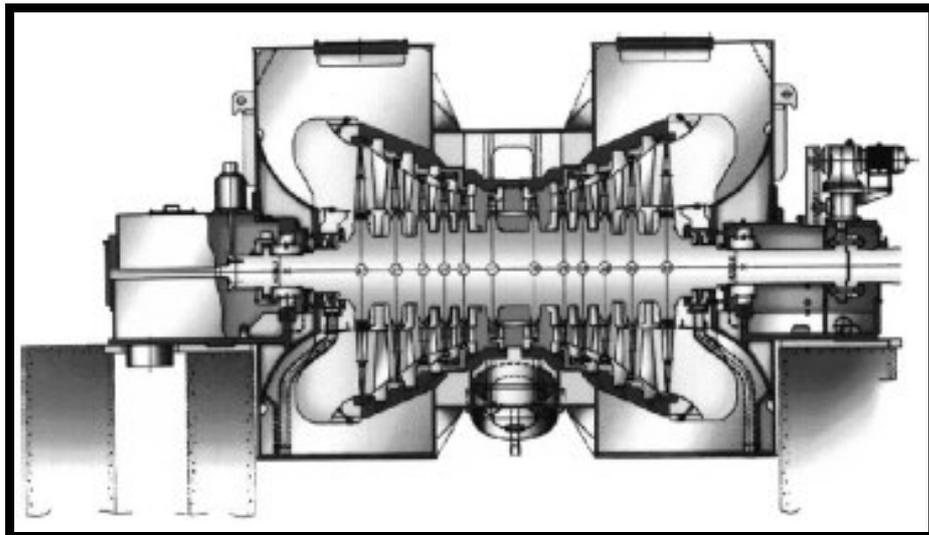


Figura 4.14 VISTA DE SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA TURBINA DE VAPOR DE DOS ETAPAS

“Upgrading an Life Extensión Technologies for Geothermal Steam Turbines” [34]

f) Generador

Las principales especificaciones son las siguientes:

Tipo	: Generador síncrono trifásico tipo horizontal (Figura 4.15)
Ventilación	: Ventilación propia.
Refrigeración	: Aire enfriado.
Potencia de salida	: 60 MVA
Voltaje	: 33 kV.
Factor de potencia	: 0.85
Frecuencia	: 60 Hz
Clase de aislamiento	: F.

Principales protecciones a la corrosión

Bobina y aislamiento del estator	: Aislamiento bajo presión de vacío.
Núcleo del estator	: Revestimiento especial.
Bobina y aislamiento del rotor	: Revestimiento especial.
Purificación del aire	: Purificado por filtro especial.

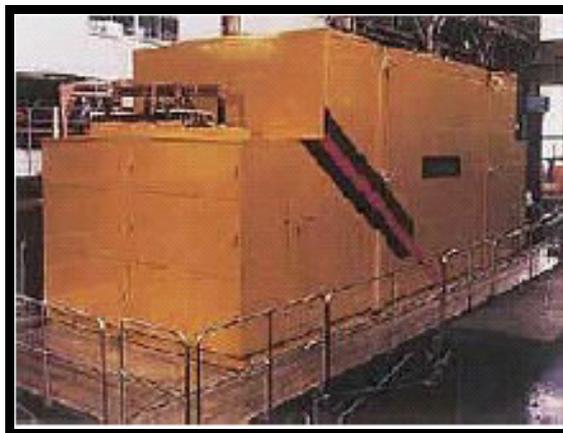


Figura 4.15 GENERADOR ENFRIADO POR AIRE

“Upgrading an Life Extensión Technologies for Geothermal Steam Turbines” [34]

g) Condensador

El condensador es de contacto directo, tipo nivel bajo. El agua de refrigeración de la torre de enfriamiento es inyectada directamente en la salida del vapor a través de los inyectores de chorro por la diferencia de presión entre la torre de enfriamiento y el condensador, y el nivel normal de agua en el condensador es mantenido por las válvulas de control situadas aguas abajo de la bomba de condensado (Figura 4.16).



Figura 4.16 CONDENSADOR DE CONTACTO DIRECTO

“The Basics of Geothermal Power Conversion” [32]

El condensador está compuesto por las conexiones para la entrada del vapor, la cubierta superior, cubierta inferior y el tubo barométrico. Las conexiones de la entrada del vapor se construyen con juntas de dilatación inoxidable para prevenir la deformación de la armazón de la turbina y del condensador. La cubierta inferior se compone de una zona que condensa y de tres zonas de enfriamiento del isopentano. Las cubiertas del condensador son de acero al carbón con una capa de resina de epóxica. El tubo barométrico se hace de bronce.

Las principales especificaciones del condensador son las siguientes:

Presión de condensación	: 0.5 bar.
Flujo de vapor	: 360 kg/s.
Flujo de agua de enfriamiento	: 600 kg/s.
Temperatura de agua de enfriamiento	: 25°C.

h) Torre de enfriamiento

Las principales especificaciones son las siguientes:

Tipo	: Tipo húmedo, flujo contrario
Número de celdas	: 3

La estructura de las torres son construidas con acero del tipo AISI-4140; son embaladas con madera y fibra de vidrio. (Figura 4.17)



Figura 4.17 TORRE DE ENFRIAMIENTO TIPO HÚMEDO

“The Basics of Geothermal Power Conversion” [32]

i) Equipos auxiliares

- Sistema de alimentación del isopentano
- Bombas de condensado y de reinyección.
- Compresor de gases no condensables.
- Eyectores de vapor.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO ECONÓMICO-FINANCIERO

La evaluación económica de una planta geotérmica bajo la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, vigente en el Perú incluye los siguientes ítems:

Costos

- Subproyectos: Permisos, caminos de acceso, concesiones, estudios de impacto ambiental, indemnizaciones, difusión del proyecto y apoyos a la comunidad.
- Exploración de la zona (incluye en general 2 pozos profundos por área de exploración).
- Equipamiento de los pozos y vapoductos.
- Construcción de la central generadora.
- Construcción de subestación y líneas de transmisión.
- Operación y mantenimiento del campo geotérmico y de la central.
- Costos de peajes asociados al sistema de transmisión.

Ingresos

- Ingresos por concepto de ventas de energía en el mercado pool, clientes libres y clientes regulados.

- Ingresos por concepto de potencia y eventualmente servicios complementarios.
- Ingresos por concepto de contratos bilaterales físicos.
- Ingresos por concepto de subsidios o franquicias asociadas a fomentos de desarrollo de energías renovables.

5.1. Criterios para Evaluación Económica

Para la evaluación económica se han considerado los siguientes criterios:

- El criterio central establecido es el de suponer escenarios futuros de tipo conservador. Lo anterior se sustenta en tener un punto base de análisis robusto frente a juicios diferentes sobre los múltiples supuestos necesarios para realizar la evaluación.
- En el contexto de lo explicado en el punto anterior, se considera a una central despachada en base. También analizaremos las variaciones económicas si la central es despachada en media punta (hora punta: 18 – 23 horas).
- Como caso base se considera un horizonte de evaluación de 20 años. Sin embargo, con los cambios requeridos, se puede realizar un manejo anual del horizonte de evaluación.
- Los peajes de transmisión son estimados para el caso base, con un pago estimado de 50% por parte de los generadores y un 50% por parte de los consumidores.
- La evaluación económica se realiza según el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo de recuperación (t_R). Para el caso base se considera una tasa de descuento del 12%.

- Las cifras serán calculadas en dólares.

5.2. Descripción de Inversiones, Costos e Ingresos⁵

La evaluación económica requiere de modelos que permitan establecer los costos de inversiones, costos asociados al funcionamiento y los ingresos producto de la participación en el mercado de la empresa. En cada uno de los puntos, en la medida que amerite, se especifican las características particulares.

a) Inversiones

Las inversiones han sido evaluadas de acuerdo a lo observado a nivel internacional a características particulares de su aplicación al caso peruano, considerando los siguientes puntos:

a.1) Exploración

- Estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y otros. Son estudios que tienen por objetivo determinar el potencial geotérmico de un área específica en términos preliminares (1 área típica es de aproximadamente 3000 ha). Para garantizar buenos resultados, se requiere estudiar al menos 4 áreas, de las cuales se estima la selección de 2 para la siguiente etapa, a un costo de US \$100,000 por cada área estudiada geológicamente, US \$60,000 por cada área estudiada geoquímicamente, US \$200,000 por cada área estudiada geofísicamente, y US \$100,000 por estudios menores, generando un costo total asociado a estudios de US \$1'540,000.

⁵ “Simulación Preliminar de Desempeño Operacional y Comercial de Centrales de Generación Eléctrica Geotérmica y Eólicas” [25]

- Perforación de pozos exploratorios. Para profundizar y verificar los estudios realizados, se realizan perforaciones para la construcción de 4 pozos exploratorios de 4" de diámetro a 1500 m de profundidad, 2 pozos en cada área seleccionada en la etapa previa. Cabe hacer notar que no se pretende utilizar estos pozos posteriormente como pozos productores. El costo de cada pozo asciende a US \$1'000,000, arrojando éste un total de US \$4'000,000.

Total Exploración: US \$5'540,000.

a.2) Construcción de pozos y vaporductos

- Perforación de pozos productores. Para obtener el vapor necesario para generar 50 MW, se realizan perforaciones para la construcción de 6 pozos productores de 9"5/8 de diámetro a 1500 m de profundidad, de los cuales, 1 se destinará a reinyección. El criterio de definir 1 pozo de reinyección cada 5 pozos de extracción se sustenta en la relación de volumen existente entre el estado líquido y de vapor del agua extraída. Cada pozo tiene un costo aproximado de US \$1'500,000, lo que se traduce en US \$9'000,000 para este ítem.
- Equipamiento de superficie. Corresponde a bombas, equipo de control y equipos de apoyo de procesos tales como grúas, equipos contra incendio, grupo auxiliar. El costo es de US \$800,000 por el módulo de 50 MW.
- Vaporductos. Corresponde a la tubería de aducción del vapor, a la cual se le estima un costo de US \$500,000 para cada pozo.
- Acueductos. Análogo a los vaporductos, conduce los fluidos destinados a la reinyección. Su costo se estima en US \$100,000.

Total Construcción Pozos y Vaporductos de ambos proyectos: US \$12'400,000.

a.3) Planta eléctrica

- Maquinaria: Consta de una turbina de 2 etapas, separador, precalentador, vaporizador, bomba de condensado, condensador, torre de enfriamiento y generador eléctrico, totalizando un costo estimado de US\$ 27'500,000.
- Obras civiles: Corresponde a estructuras de la central tales como los edificios principal y auxiliar que cobijan la casa de control, las oficinas, los tableros, el local de baterías y talleres. El costo asciende a US \$2'000,000.
- Montaje e instalación. Corresponde al trabajo de ingeniería requerido para la habilitación de la planta, a un costo de US \$2'000,000.
- Subestación y transformador. El costo aproximado es de US \$1'000,000.

Total Planta Eléctrica: US \$ 32'500,000.

a.4) Transmisión

- Línea de transmisión. Se considera la construcción de una línea de transmisión de 30 km a un costo de US \$3'000,000 diseñada para operar a voltaje nominal de 33 kV.

Total Transmisión: US \$3'000,000.

a.5) Subproyectos

- Caminos de acceso. Se estima un valor promedio para la construcción de caminos en sectores de difícil acceso de US \$30,000 por cada km.
- Estudios de impacto ambiental. El costo estimado es de US \$150,000.
- Indemnizaciones. Se desestima un desembolso por este concepto debido a que los proyectos están emplazados en terrenos fiscales.

Total Subproyectos: US \$300,000.

En la Tabla 5.1 se muestra el resumen de lo descrito anteriormente.

INVERSIONES

1.- Exploración

Item	Monto Unitario (US\$)	Cantidad	Total (US\$)
Estudio geológico de área	100000	4	400000
Estudio geoquímico de área	60000	4	240000
Estudio geofísico de área	200000	4	800000
Otros estudios	100000	1	100000
Concesión de exploración	0	4	0
Perforación de pozos exploratorios (1.500 m, 4")	1000000	4	4000000

Exploración **\$5,540,000.00**

2.- Pozos y Vaporductos

Item	Monto Unitario (US\$)	Unid. por módulo	Monto Módulo (US\$)
Perforación de pozos productores (1500 m, 9"5/8)	1500000	6	9000000
Equipamiento de superficie	800000	1	800000
Vaporductos	500000	5	2500000
Acueductos	100000	1	100000

Pozos y Vaporductos **\$12,400,000.00**

* 1 módulo tiene una capacidad de 50 MW

3.- Planta Eléctrica

Item	Monto Unitario (US\$/kW)	kW por módulo	Monto Módulo (US\$)
Maquinaria	550	50000	27500000
Obras civiles	40	50000	2000000
Montaje e instalación	40	50000	2000000
Subestación	20	50000	1000000

Planta Eléctrica **\$32,500,000.00**

* 1 módulo tiene una capacidad de 50 MW

4.- Transmisión

Item	Monto Unitario (US\$/km)	Cantidad (km)	Total (US\$)
Líneas de transmisión (33 KV)	100000	30	3000000

Transmisión **\$3,000,000.00**

5.- Subproyectos

Item	Monto Unitario	Cantidad	Monto Total (US\$)
Indemnizaciones	0	0	0
Estudios de impacto ambiental	150000	1	150000
Caminos de acceso (US\$/km)	30000	5	150000

Subproyectos **\$300,000.00**

TOTAL INVERSION **\$53,740,000.00**

US\$/kW **1,074.80**

Tabla 5.1 RESUMEN DE INVERSIONES DE LA PLANTA GEOTÉRMICA

b) Costos

Los costos han sido evaluados de acuerdo a la estructura observada a nivel internacional y a características particulares de su aplicación al caso peruano, considerando los siguientes puntos:

b.1) Operación y mantenimiento

- Personal. Para operar la planta de 50 MW se requiere de la participación de 10 personas y para la operación del campo geotérmico otras 18 personas. Cabe hacer notar que los requerimientos de personal para plantas de mayor capacidad se incrementan a una tasa mucho menor en relación a la tasa de incremento de la capacidad instalada.
- Mantenimiento. Equivale al 1,5% de la inversión en pozos y vaporductos, y en la planta eléctrica.
- Administración y gastos generales. Corresponden al 20% de los gastos relativos al personal y mantenimiento.
- Seguros e impuestos. Están evaluados en el orden del 1.2% de la inversión en pozos y vaporductos, y en la planta eléctrica.

Total Costo Anual de Operación (promedio): US \$583,737.02.

En la Tabla 5.2 se muestra el resumen de lo descrito anteriormente.

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO			
Item	0	1	...
Personal	0	\$180,000.00	...
Mantenimiento	0	\$673,500.00	...
Administración y gastos generales	0	\$170,700.00	...
Seguros e impuestos	0	\$538,800.00	...
Costos de operación y mantenimiento	0	\$1,563,000.00	...
Total Costo de O&M actualizado		\$11,674,740.38	
Costo Anual Promedio		\$583,737.02	

Tabla 5.2 RESUMEN DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

b.2) Permisos

- Concesión de explotación: El numeral 2.1 del Artículo 2° de la Ley N° 27435 de la Ley de Concesiones Eléctricas dispone que “En el caso de concesiones definitivas de generación, el monto de la garantía será equivalente al 1% (uno por ciento) del presupuesto del proyecto con un tope de cincuenta (50) UIT (1 UIT ≈ \$1,050); extendiéndose su vigencia hasta la suscripción del correspondiente contrato de concesión”. Esto implica un costo aproximado de US \$52,500 anuales.
- Peajes de transmisión. Se estiman un costo de peaje de transmisión de US \$32,500 anuales.

Total Permisos Anual (promedio): US \$ 31 745.14.

En la Tabla 5.3 se muestra el resumen de lo descrito anteriormente.

PERMISOS			
Item	0	1	...
Concesión de explotación	0	\$52,500.00	...
Peajes de transmisión	0	\$32,500.00	...
Costos de permisos	0	\$85,000.00	...

Total Permisos actualizado **\$634,902.71**
Costo Anual Promedio **\$31,745.14**

Tabla 5.3 RESUMEN DE COSTOS DE PERMISOS

c) Ingresos

c.1) Ingreso por concepto de venta de energía

Para el campo geotérmico de Borateras la energía se valoriza según el último precio de barra en Aricota (que alimenta a la subestación de Tarata) calculado por la Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria (GART) de 9.55 ctm.S/./kW.h (2.94 ctm.\$/kWh) para horas en punta y 8.74 ctm.S/./kW.h (2.69 ctm.\$/kWh) para horas fuera de punta. Este precio se supone constante para el período de análisis.

- Despacho en Base

La energía anual generada por la central se estima en 402'960,000 kWh por 50 MW de potencia instalada suponiendo un factor de planta de 0.92, se considera 5 horas en punta y 19 horas fuera de punta.

En la Tabla 5.4 se muestra el ingreso por energía con el despacho en base.

INGRESO POR ENERGÍA	
COSTO (\$/KW-h)-HP	0.0294
CONSUMO ANUAL-HP (KW-h)	83950000
Total Energía Anual-HP	\$2,468,130.00
COSTO (\$/KW-h)-FHP	0.0269
CONSUMO ANUAL-FHP (KW-h)	319010000
Total Energía Anual-FHP	\$8,581,369.00
Ingreso Total por Energía actualizadas	\$82,533,609.86

Tabla 5.4 RESUMEN DE INGRESO POR ENERGÍA – DESPACHO EN BASE

- Despacho en Media Punta

La energía anual generada por la central se estima en 235'060,000 kWh por 50 MW de potencia instalada suponiendo un factor de planta de 0.92, se considera 5 horas en punta y 9 horas fuera de punta.

En la Tabla 5.5 se muestra el ingreso por energía con el despacho en media punta.

INGRESO POR ENERGÍA	
COSTO (\$/KW-h)-HP	0.0294
CONSUMO ANUAL-HP (KW-h)	83950000
Total Energía Anual-HP	\$2,468,130.00
COSTO (\$/KW-h)-FHP	0.0269
CONSUMO ANUAL-FHP (KW-h)	151110000
Total Energía Anual-FHP	\$4,064,859.00
Ingreso Total por Energía actualizadas	\$48,797,793.03

Tabla 4.5 INGRESO POR ENERGÍA – DESPACHO EN MEDIA PUNTA

c.2) **Ingreso por concepto de venta de potencia**

El último precio de la potencia en barra de Aricota (que alimenta a la subestación de Tarata) es de 28.14 S/./kW-mes (8.66 \$/kW-mes). Cabe hacer notar que se espera un incremento de un 5% anual en el valor de la potencia firme hasta aproximadamente el año 2026, por lo que se considera la ponderación de los ingresos por este concepto en Borateras, por un factor igual a 1,05 compuesto anualmente para un periodo de veinte años. La razón que sustenta este supuesto es la existencia de un sobredimensionamiento de la capacidad instalada y una tasa de crecimiento de la demanda de un 5% anual, lo que se manifiesta en el monto total recaudado por concepto de pago de potencia en igual proporción.

- **Despacho en Base**

La potencia firme entregada por la central de este yacimiento se estima en 49.67 MW por 50 MW de capacidad instalada.

En la Tabla 5.6 se muestra el ingreso por potencia con el despacho en base.

INGRESO POR POTENCIA	
COSTO (\$/KW-mes)	8.66
POTENCIA FIRME ANUAL (MW)	49.67
Total Potencia Anual	\$5,161,706.40
Ingreso Total por Potencia actualizadas	\$50,160,544.49

Tabla 5.6 RESUMEN DE INGRESO POR POTENCIA – DESPACHO EN BASE

- **Despacho en Media Punta**

La potencia firme entregada por la central de este yacimiento se estima en 28.97 MW por 50 MW de capacidad instalada.

En la Tabla 5.7 se muestra el ingreso por potencia con el despacho en media punta.

INGRESO POR POTENCIA	
COSTO (\$/KW-mes)	8.66
POTENCIA FIRME ANUAL (MW)	28.97
Total Potencia Anual	\$3,010,995.40
Ingreso Total por Potencia actualizadas	\$29,260,317.62

Tabla 5.7 INGRESO POR POTENCIA – DESPACHO EN MEDIA PUNTA

5.3. Evaluación Económica

A continuación se realiza una breve descripción de conceptos utilizados:

- Inversión

Lista los principales componentes requeridos para la construcción y el adecuado funcionamiento de una central geotermoeléctrica con sus respectivos costos, detallando los costos de inversión respectivos.

- Costos

Estima los costos asociados a la operación y mantenimiento de la planta, incluyendo los peajes y el pago anual por concepto de concesión de explotación.

- Ingresos

Estima los ingresos asociados a la producción de energía y pago por potencia.

- Valor Actual Neto (VAN)

Es la diferencia entre todos los ingresos y los egresos actualizados al período actual. Según el criterio del valor actual neto el proyecto debe aceptarse si su valor es positivo. El tiempo evaluado es de 20 años y la tasa de descuento es de 12%.

- Tasa Interna de Retorno (TIR)

Es aquella tasa que hace que el valor actual neto sea igual a cero. El proyecto debe aceptarse cuando la tasa interna de retorno sea mayor a la tasa de descuento. El tiempo a evaluar se mantiene igual.

- **Tiempo de recuperación (t_R)**

Consiste en determinar el período para la recuperación de la inversión inicial. A menor tiempo se considera al proyecto más rentable.

a) **Despacho en Base**

En la Tablas 5.8 se muestra la evaluación económica para el despacho considerado en base.

EVALUACIÓN ECONÓMICA	
Inversión	\$53,740,000.00
Costo de O&M Actualizado	\$11,674,740.38
Costo de Permisos Actualizado	\$634,902.71
Ingreso de Energía Actualizado	\$82,533,609.86
Ingreso de Potencia Actualizado	\$50,160,544.49
VAN(20 años)	\$66,644,511.25
TIR(%)	26.87%
t_R(años)	4.95

Tabla 5.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA – DESPACHO EN BASE

b) **Despacho en Media Punta**

En la Tablas 5.9 se muestra la evaluación económica para el despacho considerado en media punta.

EVALUACIÓN ECONÓMICA	
Inversión	\$53,740,000.00
Costo de O&M Actualizado	\$11,674,740.38
Costo de Permisos Actualizado	\$634,902.71
Ingreso de Energía Actualizado	\$48,797,793.03
Ingreso de Potencia Actualizado	\$29,260,317.62
VAN(20 años)	\$12,008,467.56
TIR(%)	13.52%
t_R(años)	12.41

Tabla 5.9 EVALUACIÓN ECONÓMICA – DESPACHO EN MEDIA PUNTA

5.4. Comentarios

- El estudio económico para el caso de despacho en base y media punta revela que la evaluación posee un VAN>0 y un TIR>12%. Se concluye que para las consideraciones realizadas, el proyecto se presenta como muy atractivo desde el punto de vista de la inversión privada.
- El proyecto aparece más atractivo cuando se considera como caso base, lo cual es factible, tomando en cuenta que su costo marginal es más bajo que el de las centrales termoelectricas convencionales.
- Para los costos de operación y mantenimiento, se ha considerado que la central despacha 50 MW desde el primer año. Para disminuir estos costos se podría suponer que la planta despacharía esta potencia recién en el quinto año, con lo cual resultaría más atractivo el proyecto.
- Los precios de potencia y energía se han considerado constantes para realizar la evaluación, con lo cual hemos evaluado un caso conservador. En la Figura 5.1. se muestran los intervalos de costos de energía.

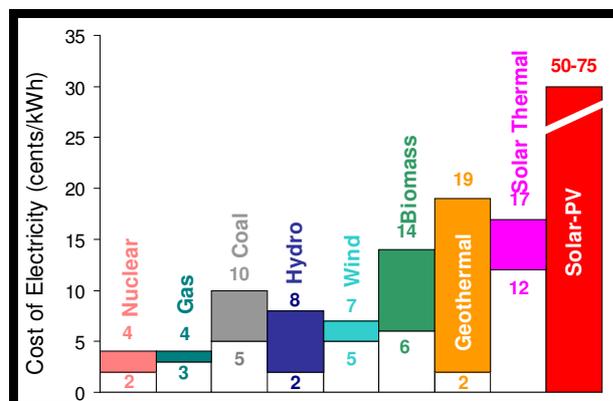


Figura 5.1 INTERVALO DE COSTOS DE ENERGÍA POR CADA TIPO DE TECNOLOGÍA EN GENERACIÓN ELÉCTRICA

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

- El costo de capital de una planta geotérmica es habitualmente mayor que una planta similar alimentada por combustibles convencionales. Contrariamente, la energía que acciona una planta geotérmica cuesta mucho menos que el combustible convencional, y su costo corresponde al costo de mantención de los elementos geotermales de la planta. El mayor costo de capital debería recuperarse por el ahorro en costos de energía. Por lo que el sistema recurso-planta se ha programado para una duración suficiente como para amortizar el costo inicial.
- Se puede obtener ahorros apreciables adoptando sistemas integrados que permitan un factor de utilización mayor (por ejemplo, calefacción ambiental y refrigeración) o sistemas en línea, donde las plantas están conectadas en serie, cada una utilizando el fluido de la planta precedente (por ejemplo, generación de electricidad + calefacción de invernaderos + crianza de animales), como se muestra en la Figura 5.2.

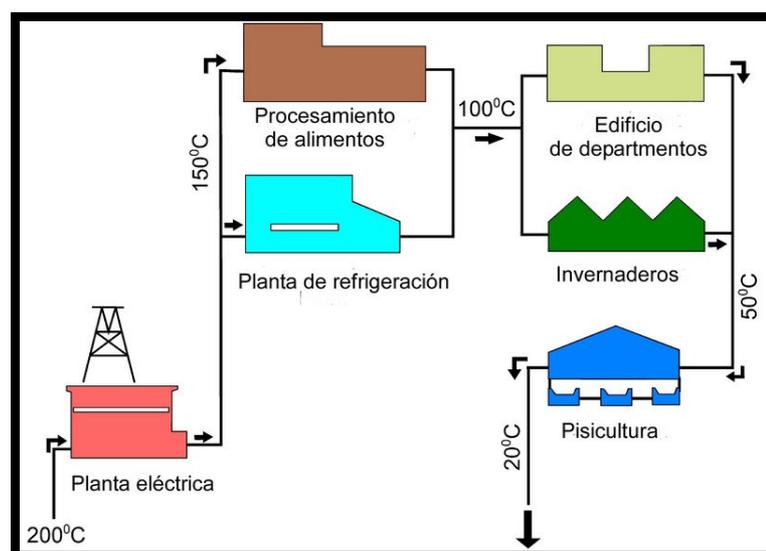


Figura 5.2 USOS EN LÍNEA DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

“Introduction to Geothermal Energy Slide Show” [14]

5.5. Criterios para el Financiamiento

Para obtener el financiamiento se deberán demostrar los siguientes criterios:

a) Factibilidad técnica

Bajo un estricto estudio técnico se debe asegurar la utilización de tecnología actual para la protección de este tipo de recursos y la capacidad de ser repotenciada cuando la demanda así lo requiera y los recursos aun sean disponibles.

La estructura y composición de una planta geotérmica es muy similar a la de una planta termoeléctrica de vapor, teniendo como diferencias la fuente de calor y separadores de fase principalmente, por lo que se puede asegurar su repotenciación dependiendo tan solo de la disponibilidad de recursos.

En este trabajo se desarrollado un modelo teórico de una planta geotérmica de generación eléctrica con ciclo combinado, con una turbina de dos etapas, obteniendo la eficiencia de 15.04%. Si bien es cierto esta eficiencia es baja comparada con una central térmica a vapor, pero se encuentra en el intervalo óptimo de eficiencia para este tipo de centrales geotérmicas. Si bien se han obviado algunos factores que pueden mejorar esta eficiencia también se debe tener en cuenta que existe la probabilidad de que los recursos a explotar sean del tipo vapor dominante o vapores secos lo cual incrementaría la potencia instalada en la planta y la eficiencia notablemente, la eficiencia podría llegar a ser 25%.

Los flujos residuales pueden ser empleados en diversas aplicaciones en donde se aproveche la composición química de los fluidos así como el calor remanente.

b) Factibilidad económica

En nuestro estudio analizamos dos escenarios: despacho en base y despacho en media punta, siendo el más rentable el despacho en base.

En el despacho en base se obtiene un VAN de US \$66'644,511.25, un TIR de 26.87% y un tiempo de recuperación de 5 años, es decir, el proyecto es factible generando grandes ganancias, haciéndolo más atractivo para la inversión.

En el despacho se obtiene un VAN de US \$12'008,467.56, un TIR de 13.56% y un tiempo de recuperación de 13 años, es decir, el proyecto es factible pero las ganancias son moderadamente atractivas.

El estado peruano a través del Ministerio de Energía y Minas promueve y fomenta el desarrollo de recursos renovables y/o no convencionales pudiendo dar inclusive la oportunidad de despachar en base para recibir mayores pagos por energía.

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.

c) Marco legal establecido

Hasta la actualidad en el Perú existen dos leyes vigentes que contemplan la explotación de este tipo de recursos, estas son: la "Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos" y la "Ley de Concesiones Eléctricas". La primera establece la concesión de este tipo de recursos y la segunda la concesión para la generación y comercialización de energía eléctrica con este tipo de recursos.

d) Estabilidad jurídica y tributaria

En Perú se aprobó la ley de geotermia, cuya formulación contó también con el aporte de los expertos del proyecto CEPAL/DGXVII.

Por ejemplo en Chile la ley de geotermia se encuentra todavía en trámite de aprobación en el Senado de la República. En la Argentina, en Ecuador y en Bolivia se está considerando la posibilidad de elaborar un reglamento específico.

Dentro del proceso de privatización y modernización del Estado, en el que están inmersos todos los países, todavía se discuten parámetros jurídicos que regulen los mecanismos de participación del Estado y del sector privado con respecto al recurso geotérmico. Hay una amplia gama de situaciones desde: que el Estado mantenga solamente el manejo del recurso geotérmico y ceda el proceso de conversión de energía; hasta que la misma ceda el manejo integral del recurso y la generación al sector privado, manteniendo el Estado la función reguladora y la planificación indicativa.

Se debe tener en cuenta que para el desarrollo de este tipo de tecnologías se requieren normas técnicas y otras leyes específicas para el uso apropiado y regulado de este tipo de recursos.

e) Impacto ambiental

Los estudios muestran claramente que los factores que contribuyen a la contaminación por el efecto invernadero son casi nulos, como lo muestran los índices de contaminación, como lo son las emisiones de CO₂, las emisiones de H₂S, emisiones de NO_x.

Así también 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 impactos ambientales durante la construcción y operación del proyecto, control de calidad, salud y seguridad ocupacional, planes de contingencia y programas sociales.

5.6. Entes con capacidades de Inversión

El Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo y otras empresas privadas internacionales, con sus programas especiales en desarrollo en energías renovables, invierten en el desarrollo y la financiación de proyectos de este tipo, debido al acuerdo tomado en el tratado de Kyoto.

CONCLUSIONES

- Se cumplió con el objetivo de diseñar una planta geotérmica de generación eléctrica con ciclo combinado, con una turbina de dos etapas y potencia instalada de 50 MW.
- Se demostró la viabilidad de la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos de nuestro país en el campo geotérmico de Borateras (provincia de Tarata, departamento de Tacna).
- 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.
- No requieren grandes extensiones de terreno, ya que no prescinde de tanques y sistemas de almacenamiento de combustibles, lo cual es positivo para el equilibrio del ecosistema.
- 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 presto 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

- [1] “Anuario estadístico electricidad 2005” – Dirección General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, 2006.
Página web: http://www.minem.gob.pe/electricidad/pub_anuario2005.asp
- [2] “Conceptual Modelling of a Power Plant for the Sabalan Geothermal Area, Iran”- Mohsen Taghaddosi, The United Nations University, 2003
Página web: <http://www.iranenergy.org.ir/english/articles/pdf/0005.pdf>
- [3] “Considerations in two-phase geothermal gathering system design” - William E. Lewis, Power Engineers. United Nations Environment Programme, 2004.
Página web: www.unep.org/gef/content/pdf/20-Lewis.pdf
- [4] “Energía Geotérmica”- H. Christopher, H. Armtead.
Editorial Limusa, 1997.
- [5] “Energía Geotérmica en la Región Tacna” – Gobierno Regional Tacna, 2006.
Página web:
http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/publicaciones/taller_geotermia/5.pdf
- [6] “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
- [7] “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_alternativas/material_difusion/UTILIZACION_DE_LA_ENERGIA_GEOTERMICA_DOCUMENTO_DESCRIPTIVO.pdf

- [8] “Generación Eléctrica a partir de Fuentes Nuevas: Energía Geotérmica”- Ministerio de Energía y Minas, 2001.
Página web:
http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/publicaciones/atlasmineriaenergia2001/electricidad/energia_geotermica.pdf
- [9] “Geothermal Portable Turbine Generator” – Toshiba
http://www.tic.toshiba.com.au/power/product_brochures_and_reference_lists/gpp.pdf
- [10] “Geothermal Energy” - Adrien T. Robinson, Chicago Kent College of Law, 2003.
Página web:
<http://kentlaw.edu/classes/fbosselm/Spring2003/student%20presentations/Geothermal-Robinson.ppt>
- [11] “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>
- [12] “Geothermal Energy” - Keith E. Holbert, Ph.D., Associate Professor Electrical Engineering Department Arizona State University, 2002.
Página web:
<http://www.eas.asu.edu/~holbert/eee463/GEOTHERMAL.HTML>
- [13] “Geothermal Power Plant” – Toshiba, 2006.
Página web:
http://www.tic.toshiba.com.au/power/product_brochures_and_reference_lists/gpp.pdf
- [14] “Introduction to Geothermal Energy Slide Show” - Geothermal Education Office, 2000.
Página web: <http://geothermal.marin.org/GEOpresentation/>
- [15] “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
- [16] “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/biogeopresenta/einterna.ppt#1>

- [17] “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
- [18] “Potencial disponible de Energía Geotérmica” – Ministerio de Energía y Minas, 2001.
Página web:
http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/publicaciones/atlasmineriaenergia2001/electricidad/2001_potenc_disponibl_ener_geotermic.pdf
- [19] “Precios en barra en Subestaciones Base” – Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria, Osinergmin, 2006.
Página web: <http://www2.osinerg.gob.pe/gart.htm>
- [20] “Protocolo de Kyoto”-Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1997.
Página web: <http://www.fonamperu.org/general/documentos/pk.pdf>
- [21] “Proyecto Regional de Energía Eléctrica para el Istmo Centroamericano (PREEICA)”, Proyecto ACADI 910-18255, Archivo No 012685/3504/47RT/002/00, 2003.
Página web:
http://www.preeica.ca/Reportes%20Tecnicos/5503_47RT_003_00.pdf
- [22] “Pumps Armstrong”
Página web: www.armstrongpumps.com
- [23] “Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos” – Decreto Supremo N° 072-2006-EM, 2006.
Página web:
<http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/publicaciones/compendio/ds072-2006.pdf>
- [24] “Steam Turbine Products” – General Electric
www.gepower.com
- [25] “Simulación Preliminar de Desempeño Operacional y Comercial de Centrales de Generación Eléctrica Geotérmica y Eólicas” – Área de Energía de la Universidad Nacional de Chile, para Comisión Nacional de Energía, 2003.
Página web: http://www.cne.cl/fuentes_energeticas/f_renovables.html

- [26] “Situación de la Geotermia en el Perú” – Jorge Aguinaga Díaz, Director General de Electricidad, Ministerio de Energía y Minas, 2006.
Página web: http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/publicaciones/taller_geotermia/3.pdf
- [27] “Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics” – Ronald Di Pippo, University of Massachusetts Dartmouth, 1999.
Página web: <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull20-2/art1.pdf>
- [28] “Standard Pipe” – Federal Steel Supply, Inc., 2003.
Página web: http://www.fedsteel.com/assets/pdfs/FSSI_STD_PChrt.pdf
- [29] “Superchanger Plate & Frame Heat Exchangers” – Tranter, 1999.
Página web: <http://us.tranterphe.com/phe/PDFs/TIS-112A.pdf>
- [30] “Tacna-Mapa Vial” - Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2004.
Página web: http://www.mtc.gob.pe/mapas_mtc/sec_map/tacna_a3.pdf
“Mapa de Líneas de Transmisión” – Ministerio de Energía y Minas, 2005.
Página web: <http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/mapas/lineasdetransmision.pdf>
- [31] “Termodinámica Aplicada”. Jaime Postigo, Juan F. Cruz.
WH Editores.
- [32] “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
- [33] “Turbine 110 MW” – Toshiba, 2006
Página web: http://www.tic.toshiba.com.au/power/product_brochures_and_reference_lists/gpp.pdf
- [34] “Upgrading and Life Extension Technologies for Geothermal Steam Turbines”. Akira SAKUMA, Toshihiro MATSUURA, Toshio SUZUKI, Osamu WATANABE and Masataka FUKUDA. JSME International Journal, 2006.
Página web: http://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmeb/49/2/49_186/_pdf
- [35] “What is Geothermal Energy?” – Mary H. Dickson, Mario Fanelli, International Geothermal Association, 2004.
Página web: <http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php>

ANEXOS

CATÁLOGO DE TUBERÍAS

Federal Steel Supply, Inc.



PIPE SIZE	O.D. IN INCHES	5	10	20	30	40	STD.	60	80	XH	100	120	140	160	XXH
1/8	.405	.035 1383	.049 1863			.068 2447	.068 2447		.095 3145	.095 3145					
1/4	.540	.049 2570	.065 3297			.088 4248	.088 4248		.119 5351	.119 5351					
3/8	.675	.049 3276	.065 4235			.091 5676	.091 5676		.126 7388	.126 7388					
1/2	.840	.065 5383	.083 6710			.109 8510	.109 8510		.147 1088	.147 1088				.187 1304	.294 1714
3/4	1.050	.065 6838	.083 8572			.113 1131	.113 1131		.154 1474	.154 1474				.218 1937	.308 2441
1	1.315	.065 8678	.109 1404			.133 1679	.133 1679		.179 2172	.179 2172				.250 2844	.358 3659
1 1/4	1.660	.065 1107	.109 1806			.140 2273	.140 2273		.191 2997	.191 2997				.250 3675	.382 5214
1 1/2	1.900	.065 1274	.109 2035			.145 2718	.145 2718		.200 3631	.200 3631				.281 4859	.400 6408
2	2.375	.065 1604	.109 2638			.154 3653	.154 3653		.218 5022	.218 5022				.343 7444	.436 9029
2 1/2	2.875	.083 2475	.120 3531			.203 5793	.203 5793		.276 7661	.276 7661				.375 1001	.552 1370
3	3.500	.083 3029	.120 4332			.216 7576	.216 7576		.300 1025	.300 1025				.437 1432	.600 1858
3 1/2	4.0	.083 3472	.120 4973			.226 9109	.226 9109		.318 1251	.318 1251				.531 2251	.710 3659
4	4.50	.083 3915	.120 5613			.237 1079	.237 1079	.281 1266	.337 1498	.337 1498		.437 1901		.531 2251	.744 3659
4 1/2	5.0					.247 1253	.247 1253		.355 1761	.355 1761				.531 2251	.710 3659
5	5.563	.109 6349	.134 7770			.258 1462	.258 1462		.375 2078	.375 2078		.500 2704		.625 3296	.750 3855
6	6.625	.109 7585	.134 9289			.280 1897	.280 1897		.432 2857	.432 2857		.562 3639		.718 4530	.864 6408
7	7.625					.301 2357	.301 2357		.500 3805	.500 3805				.875 6308	
8	8.625	.109 9914	.148 1340	.250 2236	.277 2470	.322 2855	.322 2855	.406 3564	.500 4339	.500 4339	.593 5087	.718 6063	.812 6776	.966 7409	.875 7242
9	9.625					.342 3390	.342 3390		.500 4872	.500 4872					
10	10.75	.134 1519	.165 1870	.250 2804	.307 3424	.365 4048	.365 4048	.500 5474	.593 6433	.500 5474	.718 7693	.843 8920	1.000 1041	1.125 1157	
11	11.75					.375 4555	.375 4555		.500 6007	.500 6007					
12	12.75	.165 2218	.180 2420	.250 3338	.330 4377	.406 5353	.406 5353	.562 7316	.688 8851	.500 6542	.843 1072	1.000 1255	1.125 1397	1.312 1603	
14	14.0	.250 3671	.312 4568	.375 5457	.437 6337	.437 6337	.593 8491	.750 1061	.937 1209	.500 7209	.937 1307	1.093 1507	1.250 1702	1.406 1891	
16	16.0	.250 4205	.312 5236	.375 6258	.437 8277	.437 8277	.593 1075	.750 1365	.937 1648	.500 8277	1.031 1648	1.218 1923	1.437 2235	1.593 2451	
18	18.0	.250 4739	.312 5903	.375 8206	.437 1048	.437 1048	.593 1382	.750 1708	.937 2345	.500 9345	1.156 2080	1.375 2441	1.562 2742	1.781 3085	
20	20.0	.250 5273	.375 7860	.500 1041	.593 1229	.375 7860	.812 1664	1.031 2089	.500 1041	1.280 2561	1.500 2964	1.750 3411	1.968 3790		
22	22.0	.250 5807	.375 8661	.500 1148		.375 8661	.875 1974	1.125 2508	.500 1148	1.375 3029	1.625 3536	1.875 4030	2.125 4511		
24	24.0	.250 6341	.375 9462	.562 1408	.688 1712	.375 9462	.968 2381	1.218 2964	.500 1255	1.531 3674	1.812 4294	2.062 4831	2.343 5419		
26	26.0	.312 8560	.500 1362			.375 1026			.500 1362	.750 2023	1.000 2670	1.250 3304	1.500 3925	1.750 4511	2.000 5126
28	28.0	.312 9226	.500 1468	.625 1927		.375 1106			.500 1468	.750 2183	1.000 2884	1.250 3571	1.500 4245	1.750 4907	2.000 5554
30	30.0	.312 9893	.500 1575	.625 1961		.375 1186			.500 1575	.750 2343	1.000 3097	1.250 3838	1.500 4566	1.750 5281	2.000 5981
32	32.0	.312 1056	.500 1682	.625 2094	.688 2301	.375 1267			.500 1682	.750 2503	1.000 3311	1.250 4105	1.500 4886	1.750 5640	2.000 6408
34	34.0	.312 1123	.500 1789	.625 2228	.688 2448	.375 1347			.500 1789	.750 2663	1.000 3524	1.250 4372	1.500 5207	1.750 6035	2.000 6835
36	36.0	.312 1189	.500 1896	.625 2361	.750 2823	.375 1427			.500 1896	.750 3282	1.000 3738	1.250 4639	1.500 5527	1.750 6468	2.000 7262
42	42.0					.375			.500	.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000
48	48.0					.375			.500	.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000

Commonly Requested Unscheduled Walls

World Headquarters

Federal Steel Supply, Inc.
Saint Louis, Missouri
USA

Federal Steel Service &
Processing Center
Saint Louis, Missouri
USA

Federal Steel Service &
Processing Center
Houston, Texas
USA

☎ 1-636-537-2393

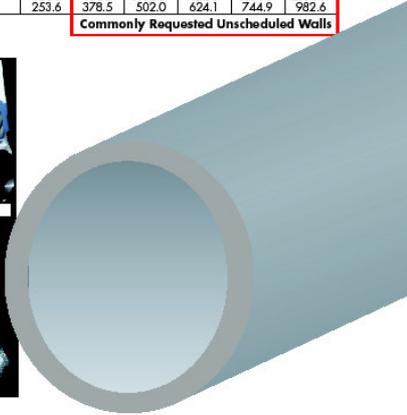
☎ 1-281-456-9148

Fax 1-636-537-8795

☎ 1-800-325-1584

http://www.fedsteel.com

E-Mail: info@fedsteel.com



CATÁLOGO DE VÁLVULAS UNIONES

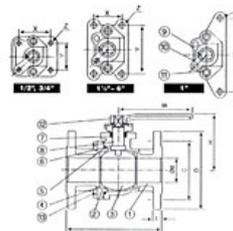
2-PC Full Port 1000 Flange Ball Valve

Check up to five results to perform an action.

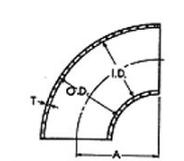
- Size: 1 inch - 16 inch (ANSI 150/300 lbs Full Bore)
- Standard
- Face-to-Face Dimensions: ANSI B16.10
- Flange Dimensions: ANSI B16.5 Class 150/300
- Pressure Test Rating: ANSI B16.34
- Materials: CF8M (SS316)
- Anti-Blow-Out Stem, Anti-Static Device
- Reinforced 15%GF/Teflon Seals and Seats
- 4-Bolt Design Actuator Mounting Pad
- Fire Safe Design (Option)



[larger image](#)

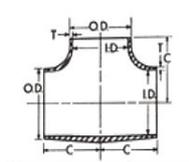


[larger image](#)



[larger image](#)

Specifications	
Schedule	5S
Nominal Pipe Size	12 inch
Outside Diameter (O.D.)	12.750 inch
Centre to Face (A)	18 inch
Inside Diameter (I.D.)	12.438 inch
Wall Thickness (T)	.156 inch

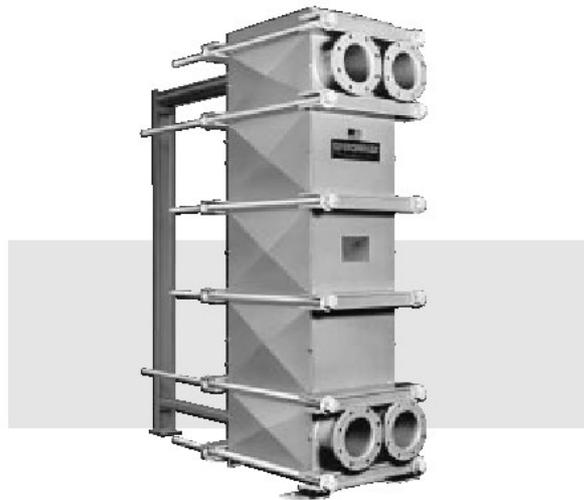


[larger image](#)

Specifications	
Schedule	5S
Nominal Pipe Size	12 inch
Outside Diameter (O.D.)	12.750 inch
Center to Face (A)	10 inch
Inside Diameter (I.D.)	12.438 inch
Wall Thickness (T)	.156 inch

CATÁLOGO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR

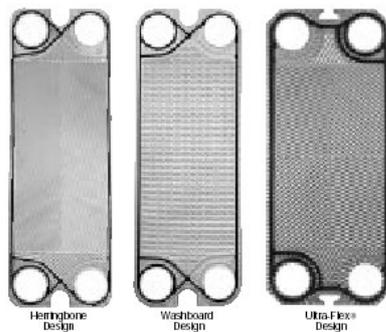
SUPERCHANGER[®]



- Highly Efficient • Low Cost • Expandable Capacity
- Guaranteed Performance • Proven in Numerous Applications
- Fast, Accurate Computer Sizing • Made in the U.S.A.

SUPERCHANGER CONDENSED SPECIFICATIONS

The data on this page provides basic condensed engineering information. All selections are calculated by computer to provide the best plate size and design fit for each specific application. More complete literature and specifications are available on request.



Pressure Rating: Up to 400 psig operating pressure

Maximum Temperature: 366°F

Heat Transfer Coefficients: Greater than 1000 Btu/hr ft² °F

Heat Transfer Surface: Up to 20,000 ft² per unit
Plates: SUPERCHANGER plates are fabricated from virtually any metal that can be cold-worked, including stainless steel (types 304, 316, 317, etc.), titanium, Monel, nickel, alloys 825, 20Cb-3, B-2, G, C-276 and others.

Frames: Carbon steel with baked epoxy enamel paint, side bolts and shroud.

Nozzles: 150 lb. rated flange type, with other options available.

Gaskets: Nitrile, Ethylene Propylene, Viton, Neoprene, Hypalon, Butyl, Teflon-encapsulated NBR and others available.

Optional Extras: Connecting frames. Threaded or clamp type nozzles. Stainless steel tightening bolts. ASME Code Stamp.

Trial Units Available: SUPERCHANGER units are available on a trial basis for in-plant testing and evaluation. Contact your Tranter representative for information on the SUPERCHANGER Trial Unit Policy.

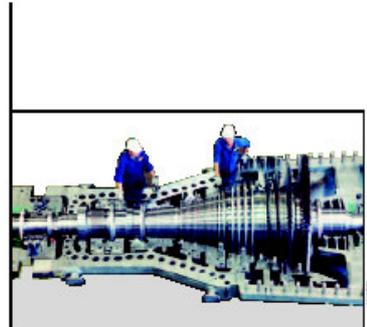
CATÁLOGO DE TURBINA DE VAPOR

Product Overview

GE offers a complete line of small steam turbines for mechanical and generator drive requirements in industrial plants and Oil & Gas applications.

GE's small steam turbines are based on modular product structures, assuring reliable design and outstanding turbine performance through standardization. This structure enables optimization of turbine configurations for a customer's specific operating conditions.

By selecting and integrating pre-engineered and field-proven components from an array of alternate offerings and designing a custom steam path, the unique requirements of the application are satisfied. Using this flexible modular structure maximizes performance and reliability while keeping product cost and delivery cycle to a minimum.



GE offers a complete line of small steam turbines that maximize performance and reliability while minimizing product cost.

Turbine Code	Type	Backpressure Limit	Max. Pressure	Max. Temp.	Single/ Multivalve	Power Range	Speed Range	Steam Path Technology
SG/SAC	Condensing	N/A	140 bar 2000 psi	540°C 1000°F	Multi	2 to 100 MW	3000 to 16000 RPM	Impulse/ Reaction
SNG/ SANC	Backpressure	60 bar	140 bar 2000 psi	540°C 1000°F	Multi	1 to 50 MW	3000 to 16000 RPM	Impulse/ Reaction
SGG/ SGDFC	Condensing Geothermal	N/A	30 bar 435 psi	300°C 572°F	Multi	5 to 100 MW	3000 or 3600 RPM	Impulse/ Reaction
AS/A9	Condensing Reheat	N/A	140 bar 2000 psi	565°C 1049°F	Multi	20 to 100 MW	3000 or 3600 RPM	Impulse/ Reaction
SDFC	Condensing Double Flow	N/A	30 bar 435 psi	300°C 572°F	Multi	5 to 100 MW	3000 to 16000 RPM	Impulse/ Reaction
P	Backpressure	20 bar	80 bar 1150 psi	480°C 900°F	Single	Up to 5 MW	Up to 16000 RPM	Impulse
MP	Backpressure	60 bar	150 bar 2150 psi	540°C 1000°F	Multi	Up to 40 MW	Up to 16000 RPM	Impulse
C	Condensing	N/A	80 bar 1150 psi	480°C 900°F	Single	Up to 6 MW	Up to 16000 RPM	Impulse
MC	Condensing	N/A	150 bar 2150 psi	540°C 1000°F	Multi	Up to 40 MW	Up to 16000 RPM	Impulse

CATÁLOGO DE GENERADOR ELECTRICO

Generator and Excitation System

Generator Output and Cooling System

RATED OUTPUT (MVA)	100	200	300	400	500	Features
<p>AIR COOLED TYPE</p>						<p>HIGH RELIABILITY</p> <ul style="list-style-type: none"> •Class F insulation is highly resistant to moisture and chemicals. <p>SHORT DELIVERY</p> <ul style="list-style-type: none"> •Modular design and standardized components offers short delivery. <p>EASY INSTALLATION AND MAINTENANCE</p> <ul style="list-style-type: none"> •Generators are shipped in the completely assembled style so as to reduce site erection period. •Brushless exciters are free from inspection and replacement of brushes.