

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA



**EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA
CON RECURSO GEOTÉRMICO EN LA REGIÓN
SUR PERUANA**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería de la Energía

AUTOR

Jose Carlos Curi Yauri (ORCID: 0000-0002-0039-8579)

ASESOR

MSc. Ximena Guardia Muguruza (ORCID: 0000-0001-7945-3691)

Lima – Perú

2021

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
ABSTRACT	6
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	15
1.1. Energía Geotérmica	15
1.2. Sistemas Geotérmicos	16
1.2.1. Tipos de Sistemas Geotérmicos	17
1.3. Reservorio Geotérmico	18
1.3.1. Componentes de un reservorio.....	19
1.4. Aplicaciones del recurso geotérmico.....	20
1.4.1. Uso directo	21
1.4.2. Generación eléctrica.....	22
1.5. Tipos de Plantas Geotérmicas para producción eléctrica.....	24
1.5.1. Centrales de destello simple.....	24
Análisis termodinámico	26
1.5.2. Centrales binarias	26
1.5.3. Centrales de Boca de Pozo.....	27
1.5.4. Desempeño de una planta de generación	29
1.6. Potencial geotérmico peruano	30
1.6.1. Eje Volcánico del Sur	31
1.7. Mercado eléctrico	31
1.8. Marco legal	33
CONCLUSIONES	35
AGRADECIMIENTOS	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Clasificación de recurso geotérmico (°C)	17
Tabla 1.2 Potencial geotérmico del Eje Volcánico del Sur	31

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Modelo esquemático de un sistema geotérmico hidrotermal.....	18
Figura 1.2 Diagrama de Lindal.....	21
Figura 1.3 Modelo esquemático de Planta Geotérmica.....	23
Figura 1.4 Esquema simplificado de una central de destello simple.....	25
Figura 1.5 Diagrama de estado (Temperatura entropía) de central de destello simple	26
Figura 1.6 Esquema simplificado de una central de ciclo binario.....	27
Figura 1.7 Mapa geotérmico del Perú	30

RESUMEN

En el presente trabajo se revisó conceptualmente tres tecnologías de generación eléctrica con recurso geotérmico. El principal objetivo fue recopilar información sobre las alternativas para la solución del déficit de generación eficiente a desarrollarse en el sur del Perú en el 2024 (Escenario pre-COVID) [1].

Se evaluaron 3 tipos de centrales de generación eléctrica (Central de boca de pozo, central destello simple y central de ciclo binario). En ese sentido, se revisaron los conceptos relacionados a la energía geotérmica, así como sus diversas aplicaciones. Seguidamente, se describe el potencial geotérmico en el Perú. Finalmente, se detalla información sobre el mercado eléctrico peruano y el marco legal relacionado.

De esta recopilación bibliográfica se rescata que la principal fuente de incertidumbre de los resultados radica en los datos superficial del Ingemmet. Asimismo, Tacna tiene un alto potencial geotérmico que puede ser utilizado para la generación eléctrica. Se recomienda la evaluación de dos tecnologías, las centrales de destello simple y de boca de pozo, a razón de su bajo costo implantación.

PALABRAS CLAVES:

Geotermia, evaluar, déficit, incertidumbre, destello simple, boca de pozo, ciclo binario

ABSTRACT

EVALUATION OF THE ELECTRIC GENERATION WITH GEOTHERMAL RESOURCE IN THE SOUTHERN REGION OF PERU

In the present investigation, three electricity generation technologies with geothermal resources were conceptually reviewed. The main objective was to collect information on the alternatives to solving the efficient generation deficit to be developed in the southern Peruvian region in 2024 (pre-COVID scenario) [1].

Three types of power generation plants were evaluated (wellhead plant, simple flash plant and binary cycle plant). In this sense, the concepts related to geothermal energy, as well as its various applications, were reviewed. Additionally, the geothermal potential in Peru is described. Finally, information on the Peruvian electricity market and the related legal framework are detailed.

From this bibliographic compilation, it is rescued that the main source of uncertainty of the results lies in the superficial data of Ingemmet. Likewise, Tacna has a high geothermal potential that can be used for electricity generation. The evaluation of two technologies, the single flash and wellhead plants, is recommended due to their low implementation cost.

KEYWORDS:

Geothermal, Evaluate, Deficit, Uncertainty, Single Flash, Wellhead, Binary Cycle

INTRODUCCIÓN

Antes de la pandemia de la COVID-19 se pronosticó que para el año 2022, el suministro eléctrico del sur del Perú se vería afectado por el retraso de la construcción del Gasoducto Sur Peruano (GSP). Este proyecto tenía el objetivo de suministrar gas natural (GN) al Nodo Energético del Sur (NES), cuya capacidad de producción de electricidad es de 14 GWe. Si bien, aún no se conoce el impacto de la pandemia sobre esta crisis de déficit de generación eficiente, el análisis de soluciones son necesarias y urgentes para garantizar una generación de electricidad eficiente y sostenible [1].

En base al informe [2] del COES¹ se prevé que para el 2022 las plantas del NES operarían con diésel para satisfacer la demanda eléctrica. En este escenario se elevarían los costos marginales de la energía, planteando un escenario de crisis dependiente del incremento de la demanda minero-energética. En un escenario de crecimiento pesimista los costos marginales se elevarían hasta los 200 USD / MWh del 2025 al 2028; mientras que en un escenario de demanda media estos valores pasarían de 200 USD / MWh en 2025 a los 400 USD / MWh en el 2028 [1].

Si el Estado Peruano promueve la construcción de centrales eléctricas con tecnologías alternativas a las térmicas con combustibles fósiles, en un plazo razonable, el retraso del suministro de gas no generaría el impacto previsto. Por lo que se requiere evaluar el impacto de la implementación de otras tecnologías cuyo recurso esté disponible en la región sur. Cabe rescatar que el informe del COES citado analiza la implementación de centrales solares fotovoltaicas y solares CSP.

En términos de energías renovables no convencionales durante el año 2020, la matriz de generación eléctrica peruana se distribuyó en 59.60% con recurso hidráulico, 34.39% con gas natural, 1.58% con solar fotovoltaico, 3.67% con recurso eólico, 0.50% con bagazo,

¹ COES-SINAC es una entidad privada con personería de derecho público que está conformada por todos los agentes del Sistema Interconectado Nacional (SEIN): Generadores, Transmisores, Distribuidores y Usuarios Libres. Está encargada de coordinar las operaciones de corto, mediano y largo plazo, del sistema eléctrico, al mínimo costo.

0.12% con biogás y 0.14% con otros combustibles fósiles [3]. Es decir, el recurso renovable no convencional, sin considerar a la mini hidro, alcanzó el 5.87% de la generación eléctrica.

Adicionalmente, existen objetivos establecidos para que las RER no convencionales representen el 20% de la matriz energética al 2040 [4]. De esta generación, la geotermia debería representar el 40%, es decir, se requiere instalar 1500 MWe al 2040, a razón del beneficio de seguridad de suministro que ofrece [4], [5]. Este objetivo se encuentra en concordancia con el informe final de las metas establecidas en el *Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú* que el MINEM desarrolló con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Cabe desatacar que, hasta el momento, en el Perú no se establecieron mecanismos ni incentivos específicos que promuevan la introducción de esta tecnología en mercado eléctrico peruano, por lo que no se ha instalado ninguna central en el país, ni tampoco perforado ningún pozo exploratorio.

La geotermia ofrece potencia firme las 24 horas del día, es independiente del precio de los combustibles y las condiciones climáticas; es decir, se considera rentable, limpia y de carga base. Es importante resaltar que la energía geotérmica es una tecnología probada que alcanza capacidades superiores a los 50 MW, dependiendo del recurso geotérmico. Tiene un menor impacto ambiental en comparación a otras tecnologías de carga base, emite de 59 a 396 lbs/MWh de $CO_{2\ eq}$ en comparación con las centrales de carbón (2200 lbs/MWh de $CO_{2\ eq}$) o gas natural (861 lbs/MWh de $CO_{2\ eq}$) [6]. Adicionalmente, el recurso geotérmico no solo permite la producción eléctrica, sino también el desarrollo económico de las poblaciones locales mediante la implementación de un sistema de uso directo para calefacción, piscicultura, invernaderos, industria, turismo y otras actividades.

En tal sentido, en la investigación se realizó una revisión bibliográfica de las tres alternativas de tecnologías de generación eléctrica (Central de boca de pozo, central de destello simple, central de ciclo binario) enfocado en la región sur del Perú y en la búsqueda de una solución sostenible al déficit de generación eficiente. Se complementará el análisis en la matriz multicriterio.

El potencial geotérmico calculado preliminarmente por el Plan Maestro asciende a 2860 MWe distribuidos en seis regiones geotermales a lo largo de Perú [7]. El 65% del potencial geotérmico se encuentra en la región geotermal denominada “Eje volcánico del Sur”. Esta región comprende a los departamentos de Arequipa, Cusco, Moquegua y Tacna.

Del estudio se pueden resaltar 13 campos geotérmicos promisorios² ubicados en la región Tacna. De los cuales se identificó a 5 campos geotérmicos de alto potencial estimados en conjunto en 420 MWe (Calientes, Borateras, Chungara-Kallapuma, Ancocollo y Tutupaca). Estos fueron estudiados con el método volumétrico a partir de información geológica, geoquímica y geofísica obtenida en el año 2012 [8]. El Ingemmet, como institución responsable del programa de estudio del recurso geotérmico, precisó en el 2018 que el campo Casiri-Kallapuma tiene un potencial de 135 MWe [9].

A pesar de los beneficios del uso directo del recurso geotérmico, la implementación y desarrollo de una central geotérmica se encuentra limitada principalmente por los precios de energía. A nivel comparativo, los costos nivelados de energía (LCOE)³ de la geotermia son comparativamente más altos que de las tecnologías convencionales, pero menores a tecnologías como las termosolares. Estos precios altos, según [10] varían entre los 75 USD a 101 USD y se deben primordialmente a los riesgos asumidos durante la etapa de exploración y confirmación del recurso. En este sentido, para fomentar el desarrollo de la tecnología se debe primero disminuir los costos de exploración como también determinar cuáles son las mejores alternativas aplicables al escenario peruano.

² Campos promisorios para el estudio geotérmico significa que las manifestaciones geotermales superficiales son, en términos cualitativos, lo suficientemente altas como para deducir la existencia de un sistema geotermal que puede ser explotado económicamente.

³ LCOE (Levelized Cost of Energy) o también denominado Costo energético nivelado es un método que permite calcular el costo de cada kilowatt-hora generado en un Sistema de Generación tomando en cuenta la infraestructura, la operación y otras variables. Así es un método de comparación de costos de diferentes tecnologías de generación eléctrica.

Alcance

La presente investigación se limita a la recopilación bibliográfica de tres propuestas de generación eléctrica con recurso geotérmico, las cuales son las centrales de boca de pozo, centrales de destello simple y las centrales de ciclo binario. Asimismo, la información que se procesará corresponde los campos geotérmicos del Perú.

Antecedentes

La investigación se enmarca en la posible crisis de déficit de generación eficiente que está pronosticada para el 2022. Las principales causas son la concentración de la generación eléctrica en el centro del país y el retraso de la construcción del GSP. En el 2019, se estimó que temporada de estiaje hidráulico, hasta el 81% de la demanda eléctrica de la zona sur era abastecida por la generación del centro del país. Debido a esta situación, la construcción del Gasoducto Sur Peruano era estratégica para lograr que la zona sur generara su energía eléctrica de forma local, eficiente y económica. Dado que aún no se ha construido el proyecto nos encontramos en una situación en donde las centrales construidas para el Nodo Energético del Sur despachan energía a base de Diésel, por lo que los costos marginales del mercado eléctricos se están elevando en función del déficit de generación eficiente en el sur [11].

A pesar de la coyuntura descrita, la región sur del Perú se caracteriza por sus vastos recursos energéticos renovables no convencionales como la solar, eólica y geotermal. Sin embargo, solo tecnologías relacionadas al recurso solar y eólico fueron implementadas en el Perú. Mientras que las de carga base como la solar CSP y la geotermia no han sido instaladas por distintas razones, entre ellas los bajos incentivos económicos.

A continuación, se citarán los antecedentes de la presente investigación enmarcadas en la búsqueda del desarrollo de la geotermia en el país:

En primer lugar, en el informe se resalta que hasta el 81% de la demanda eléctrica del sur, en estiaje hidráulico, es transportada del centro del país. Si bien se resume que en el corto plazo no se advierte ningún conflicto en la red eléctrica nacional, se prevé que a mediano plazo (2026) se presentarán congestiones en el enlace Centro-Sur debido a que la capacidad

de las líneas 220 kV Montalvo-Moquegua y la trolcal Colcabamba-Poroma-Yarabamba-Montalvo de 500 kV serán insuficientes⁴. Adicionalmente, se señala que las centrales térmicas del NES entrarían a despachar en hora punta, pero no de forma eficiente, por lo que los precios del mercado spot⁵ peruano se elevarían. Finalmente, es importante resaltar que no se define en ningún escenario el compromiso de ingreso de ninguna planta de generación con recursos renovable, a pesar del potencial RER del sur [11].

En segundo lugar, en [7] se cuantificó el potencial geotérmico del Perú en 2860 MWe distribuidos en seis regiones geotermales. Es importante resaltar que la zona comprendida entre el Sur del Perú y el Norte de Chile es un área magmática asociada a la subducción de la placa de Nazca respecto de la plaza sudamericana, lo cual explica el gran potencial geotérmico en esta zona del país. Cabe resaltar que la región geotermal Eje Volcánico del Sur contiene 25 campos geotérmicos que, en conjunto, tiene un potencial ascendiente a 1597 MWe. Adicionalmente, se resaltan las ventajas de la energía geotérmica como su baja emisión de gases de efecto invernadero, con un ciclo vida menos nocivo que emite 10 g - CO₂ / kWh. Así también se señala la característica de carga base, es decir, la disponibilidad de despacho de 24 horas al día y que es independiente de los precios de los combustibles. Es importante resaltar que el informe JICA, evaluó la competitividad de los costos de un proyecto geotérmico en relación con centrales térmicas a gas natural, carbón y diésel. Finalmente, dentro del Plan de Maestro se identifica campos promisorios para alcanzar un potencial de 735 MW al 2030.

Por otro lado, el trabajo de investigación de Luis Córdova Zapata, “Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW”, evalúa técnicamente la implementación de una central de ciclo binario con recurso geotérmico. Entre los resultados obtenidos se destaca que la TIR fue de 12%. Con la restricción económica de que la planta geotérmica comenzaría a despachar a partir del primer año de construcción. Asimismo, se plantea la implementación de un sistema integrado de energía que aumente la eficiencia de

⁴ Este escenario no sucedería en caso de que ingresasen a despachar las C.H. San Gabán 3 (188 MW), C.H. Lluta (275 MW) y C.H. Lluella (237 MW).

⁵ Mercado Spot o también llamado mercado de corto plazo es un espacio definido por la Ley de concesiones Eléctricas (Decreto Ley N° 25844) para la transfieren volúmenes entre los generadores, distribuidores y usuarios libre.

la explotación del recurso geotérmico con aplicaciones de uso directo. Finalmente, este autor verifica que la implementación de una planta de 50 MW es técnica y económicamente factible para el mercado eléctrico peruano [12].

Finalmente, la investigación de Apaza y Olazábal, “La energía geotérmica como alternativa económica y sostenible para solucionar el déficit de generación eléctrica en el sur del Perú”, simula el despacho económico de energía eléctrica con y sin despacho de energía proveniente de una planta geotérmica de 100 MW, instalados en la región sur del país. Entre los resultados obtenidos se determinó un ahorro del costo de operativo ascendente al 14.8% en el Sistema Eléctrico Nacional (SEIN) y, para la región sur, un ahorro del 42% (Periodo 2015-2016) sobre los costos de generación de energía. Este trabajo permite demostrar que una central geotérmica aportaría en solucionar el déficit de generación por su característica de carga base. Adicionalmente, los costos de generación obtenidos fueron en promedio de 62.6 USD / MWh y menor impacto ambiental en comparación a centrales de ciclo simple o combinado a gas natural [13].

Justificación y motivación

El GSP⁶ fue un proyecto concebido para garantizar la seguridad de suministro eléctrico y la generación eficiente en la región sur del Perú. En ese sentido, para garantizar la demanda de gas natural, se desarrolló el Nodo Energético del Sur, un proyecto gestionado por ProInversión⁷ cuya finalidad fue promover la inversión privada para la construcción y operación de plantas de generación termoeléctrica en el sur del país. Específicamente, la Ley N° 29970, “Ley que afianza la seguridad energética y promueve el desarrollo del polo petroquímico del sur del país” estableció los mecanismos que permitían la instalación de centrales eléctricas dual a gas natural y diésel en las regiones de Arequipa o Moquegua. Los

⁶ Gasoducto Sur Peruano

⁷ ProInversión es una institución pública peruana que promueve la inversión privada en servicios y obras públicos a través de Asociaciones Público-Privada a nivel de gobierno nacional y por el mecanismo de Obra por Impuestos a nivel de gobierno subnacional.

principales objetivos fueron abastecer la creciente demanda energética del sur del país y desconcentrar la generación del centro [1].

El operador del sistema eléctrico (COES) realizó dos informes que predicen el escenario de déficit de generación eficiente [11], [14]. En dichos informes se proyectó tres escenarios que dependían de la inversión minera a mediano plazo (2022-2028). Si en la región sur se desarrolla una alta inversión minera se requerirán hasta 400 MWe de nueva generación eficiente para suministrar la demanda. Por otro lado, en un escenario de mediano desarrollo minero se necesitarían 200 MWe. Independientemente del desarrollo minero, al 2024 la región empezará a demostrar los signos de la crisis energética. La principal consecuencia será la elevación de los costos marginales.

En general, existe una crisis con impactos evaluados que dependen principalmente de la demanda minero-energética. Entre las soluciones planteadas por los agentes se encuentra la construcción de centrales hidráulica, minihidráulicas y solares CSP. Sin embargo, específicamente la tecnología geotérmica tiene la potencialidad para solucionar el problema a mediano plazo de la misma forma que se lograría con las tecnologías anteriormente citadas. En ese sentido, es importante resaltar que los costos nivelados de energía (LCOE) de esta tecnología varían entre los 75 USD a 101 USD [10], este es costo bajo y competitivo comparativamente con las dos tecnologías anteriormente citadas.

Finalmente, la motivación para esta investigación se enmarca en la búsqueda y estudio de una tecnología geotérmica que permita aportar a la solución sosteniblemente la crisis de generación eficiente en la región sur del Perú. Es importante resaltar que la diversificación de la matriz energética no solo nos asegura confiabilidad en el sistema eléctrico, sino que también permite descentralizar la generación, desarrollando polos de desarrollo sostenible con los recursos renovables que posee el país.

Objetivo general

- Realizar una revisión bibliográfica de tres alternativas de plantas geotérmicas para la producción de energía eléctrica en el campo geotérmico Casiri-Kallapuma para la atención del déficit de generación eficiente en el Sur del Perú

Objetivos específicos

- Evaluar la seguridad de suministro eléctrico del SEIN en la zona sur del Perú.
- Evaluar técnicamente tres tecnologías de generación eléctrica: Centrales de boca de pozo, Centrales de destello simple y Centrales ciclo binario
- Describir el mercado eléctrico peruano

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

A continuación, se desarrollará la base teórica y la revisión bibliográfica que permite comparar a las diferentes tecnologías estudiadas en la investigación. En ese sentido, primero se define los conceptos básicos sobre la geotermia. Seguidamente se abordan las aplicaciones de este tipo de energía y se desarrolla la investigación específica sobre la tecnología de generación de electricidad. Finalmente, se aborda los conceptos de generación eficiente y el mercado eléctrico peruano.

1.1. Energía Geotérmica

La energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la tierra, originada durante la formación del planeta, que se encuentra en un proceso de decaimiento radiactivo. Esta emisión de energía explica los fenómenos geológicos que tienen escala planetaria como el movimiento de los continentes [15]. Adicionalmente, este término es utilizado para referirse a la energía renovable que el ser humano puede recuperar y utilizar de forma directa o generar energía eléctrica, buscando mejorar su calidad de vida.

La rama de la ciencia que estudia la energía geotérmica tiene una historia larga, pero no fue hasta entendimiento del calor radiogénico (Radiogenic heat) causado por el decaimiento radiactivo de los isótopos radiogénicos inestables de larga vida como el uranio (U^{238} , U^{235}), torio (Th^{232}) y potasio (K^{40}) que se logró crear modelos consistentes para explicar el balance de calor de la tierra y como consecuencia a la energía geotérmica [14]. Uno de estos modelos es el propuesto en Heat Balance de Stacey y Loper (1998) que estima que el calor que fluye de la tierra al espacio asciende a 42×10^{12} W, considerando todas las formas de transmisión de energía, mientras que la energía producida por los isótopos radiogénicos en el manto se estima en 22×10^{12} W, es decir, un déficit de calor en el manto

de $10,3 \times 10^{12}$ W. Así se estima que la tierra se encuentra enfriándose lentamente y que en los pasados tres mil millones de años la temperatura del manto se ha reducido en 300 °C a 350 °C, manteniéndose, en contacto con la corteza terrestre, aproximadamente en 600 °C en la actualidad.

Finalmente, la energía geotérmica es un recurso energético que a escala humano es infinita, por lo que puede ser explotado sosteniblemente utilizando las herramientas y conocimiento generadas durante la experiencia producción de energía.

1.2. Sistemas Geotérmicos

Un sistema geotérmico es sistema convectivo en el que el agua se encuentra confinada y la energía en forma de calor se transfiere desde su fuente a un sumidero, usualmente un área libre en la superficie de la corteza terrestre. Está compuesto por tres elementos principales: fuente de calor, un reservorio y un fluido que permite la transferencia de calor [16]. Los sistemas geotérmicos pueden estar compuestos por más de un reservorio interconectados entre sí, ejemplo de ello son los campos Mak-Ban en Filipinas y Kahara-Bodas en Indonesia [17].

A continuación, cabe diferenciar los términos “Sistemas geotérmicos” y “Campos geotérmicos”. Los campos geotérmicos son aquellas áreas geográficas superficiales que reciben un nombre conveniente que buscan identificarlas y diferenciarlas de otras áreas geográficas vecinas que cuentan con manifestaciones geotermiales superficiales [17]. Es decir, la denominación de los campos geotérmicos no presume el comportamiento del sistema geotérmico desarrolla debajo de la superficie. En cambio, un “Sistema geotérmico” implica el comportamiento de todo el sistema hidrológico subsuperficial asociado a un campo o campos geotérmicos conectados por el flujo del agua desde su fuente fría, su paso por el reservorio caliente y finalmente su regreso a la superficie en diversas manifestaciones como fumarolas, lagunas, entre otras.

1.2.1. Tipos de Sistemas Geotérmicos

Debido a que actualmente no se cuenta con un consenso en la tarea, existen dos métodos de clasificación de los sistemas geotérmicos. El primero divide a los sistemas geotérmicos por su forma de transferencia de energía, esta clasificación divide a los sistemas en conductivos y convectivos. Los netamente conductivos están compuesto principalmente por agua caliente y presumen un lento flujo de agua que permite la transferencia de calor. Por otro lado, en los sistemas convectivos el fluido caliente *vapor seco* es el que determina la distribución de presión, temperatura y el comportamiento del sistema en su conjunto, estos sistemas poseen una gran fuente de calor que permite el cambio de fase del fluido caliente [16].

Por otro lado, el segundo sistema de clasificación parte de la variable de la energía (entalpía). A continuación, se muestra la **Tabla 1.1** en dónde se recopila las propuestas de clasificación de cuatro distintos autores:

	(a)	(b)	(c)	(d)
Baja entalpía	<90	<125	<100	≤150
Media entalpía	90-150	125-225	100-200	-
Alta entalpía	>150	>225	>200	>150

Tabla 2.1 Clasificación de recurso geotérmico (°C). [15]

Autores:

- (a) Muffler y Cataldi (1978)
- (b) Hochstein (1990)
- (c) Benderitter & Cormy (1990)
- (d) Haenel *et al.* (1988)

Cabe precisar que las coincidencias de los autores es que los sistemas de baja entalpía son utilizados para uso directo, los de media entalpía pueden ser utilizados tanto para uso directo como para generación de energía eléctrica en centrales de ciclo binario y, finalmente, los sistemas de alta entalpía son las idóneas para la generación eléctrica por las altas temperaturas del geofluido contenido.

1.3. Reservorio Geotérmico

Los reservorios geotérmicos son secciones de volumen de roca del campo geotérmico que cumplen las características de poseer una gran fuente de calor, es permeable y tiene la posibilidad de ser explotado económicamente para la producción de calor y/o electricidad [16]. Cabe destacar que es solo una parte de la roca caliente o de los recursos hidrotermales totales. Es decir, un reservorio es un volumen de roca permeable en el cual circula un fluido que puede ser explotado económicamente.

Específicamente, DiPippo en [16] señala las siguientes características para considerar que una parte del sistema geotérmico como reservorio:

- Una gran fuente de calor
- Un reservorio permeable
- Un suministro de agua y sistema de recarga
- Una capa de cubierta de roca impermeable

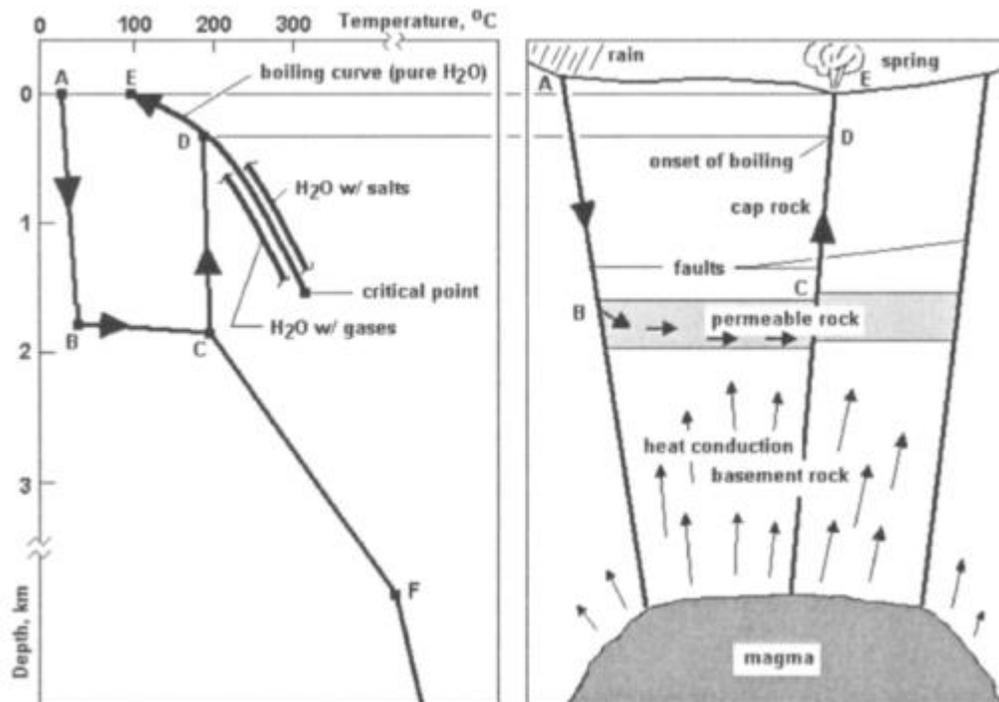


Figura 2.1 Modelo esquemático de un sistema geotérmico hidrotermal, p. 11. [16]

Como se puede observar en la **Figura 1.1**, presentada por DiPippo, la recarga de agua proviene de la lluvia (Punto A) que ingresa a través de las fallas y fracturas presentes en el reservorio hasta llegar a la fuente de calor o roca caliente que consiste en una capa de roca permeable (Punto B) de baja resistencia que permite el flujo de calor por conducción desde la intrusión del magma, en este caso, hasta la contactarse con el agua. Una vez que el agua adquiere calor (Punto C), cambia de fase y se vuelve menos denso, lo que le permite ascender a través del reservorio buscando fallas u fracturas para fluir. En este ascenso pierde presión y a la vez alcanza su punto de ebullición para su temperatura (Punto D) [16]. Cuando alcanza la superficie se manifiesta de diversas formas como las fumarolas, manantiales hidrotermales, suelos vaporizantes, pozas de lodos burbujeantes o pozas de agua caliente y geiseres.

1.3.1. Componentes de un reservorio

1.3.1.1. Fuentes de Calor

La fuente de calor puede tener distintos orígenes, una intrusión magmática o provenir de la gradiente geotermal natural de la corteza terrestre ($3^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$) que aumenta en función de la profundidad y la región geotermal en donde esta gradiente es ligeramente superior al resto del planeta. La fuente de calor de alta entalpía ($> 600^{\circ}\text{C}$) se debe a la intrusión magmática mientras que para los sistemas de mediana entalpía dependiendo de la conductividad térmica del reservorio permeable provienen de las gradientes térmicas, la temperatura de estos últimos reservorios puede oscilar entre valores menores a 100°C a las superiores de 250°C [6].

1.3.1.2. Fluido de geotermal

El Fluido geotermal es agua confinada o superficial que permite la transferencia de calor desde la fuente caliente hacia el exterior. En la mayor parte de los reservorios esta agua es meteórica en estado líquido o vapor. Dentro de este fluido de trabajo se encuentran

disueltos compuestos químicos como C_2O , H_2S , entre otros, que se mezclan naturalmente debido a las altas temperaturas del sistema geotérmico [16].

Cabe destacar que los reservorios hidrotermales presumen de una fuente de recarga de agua que mediante un sistema de fallas, poros y fisuras permite el paso de agua a través del volumen de roca reservorio desde la fuente de recarga hasta la fuente de calor.

1.3.1.3. Roca Sello

La roca sello es una capa impermeable de roca que evita que el calor del sistema escape o se transfiera al exterior rápidamente. Ejemplo de roca sello son las tierras arcillosas o las sales que se precipitan encima de los reservorios a causa de su interacción químico-física con el sistema geotérmico [16].

1.3.1.4. Fallas

Las fallas son manifestaciones geológicas que aumentan la permeabilidad de un reservorio. Estas fallas pueden fluir el agua tanto de la zona de recargo como a la fuente de calor.

1.4. Aplicaciones del recurso geotérmico

En 1973, Lindal presentó su diagrama de aplicación del fluido hidrotermal a partir de la temperatura del geofluido, este diagrama es presentado en una adaptación de Dickson y Fanelli. Es importante resaltar que este diagrama es considerado válido para determinar el uso del recurso geotérmico.

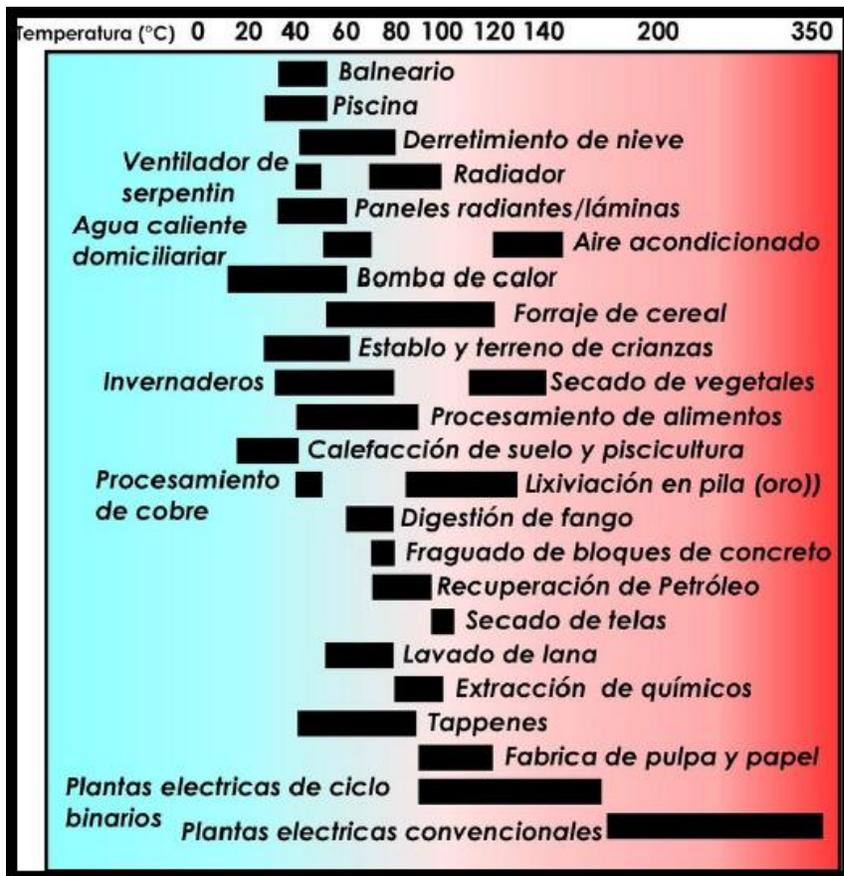


Figura 2.2 Diagrama de Lindal, p. 21. [15]

En la **Figura 1.2** se presenta el diagrama de Lindal enfatiza las variables del uso combinado y eficiente del recurso y la temperatura del geofluido que limita su uso, así se puede observar que a razón de la temperatura del fluido se recomiendan diferentes usos [15]. Cabe destacar que el límite inferior de diagrama son los 20°C, Lindal no propone ningún uso con temperaturas superiores.

A continuación, se presentan los diferentes usos del recurso geotérmico, se añade la clasificación de uso directo y generación eléctrica (Uso indirecto).

1.4.1. Uso directo

El uso directo del recurso geotérmico presume el uso del calor, del agua caliente o uso de las distintas sustancias que son liberadas en el proceso natural en presencia del recurso geotérmico. Los sistemas geotérmicos utilizados para uso indirecto suelen ser los de media

y baja entalpía. En este sentido se puede citar los distintos usos de la geotermia en diferentes campos de la economía

- a. Balneología
- b. Agricultura y acuicultura
- c. Minería
- d. Industria
- e. Calefacción
- f. Refrigeración

1.4.2. Generación eléctrica

Los sistemas geotérmicos de alta entalpía y media entalpía ($> 150^{\circ}\text{C}$) pueden ser utilizados para generar energía eléctrica. Existe también la posibilidad de generar electricidad de fuentes de baja entalpía con centrales de Ciclo Binario.

La primera planta de generación eléctrica fue la creada por Príncipe Piero Ginori en Lardarello en Italia en 1904, esta planta recibió el mismo nombre de la ciudad en donde fue construida y sus principales aportaciones de operación fueron el uso de intercambiadores de calor y el mejoramiento de la calidad de los materiales que son usados en las plantas de generación [17].

A continuación, se presenta se un esquema simplificado del funcionamiento de una central:

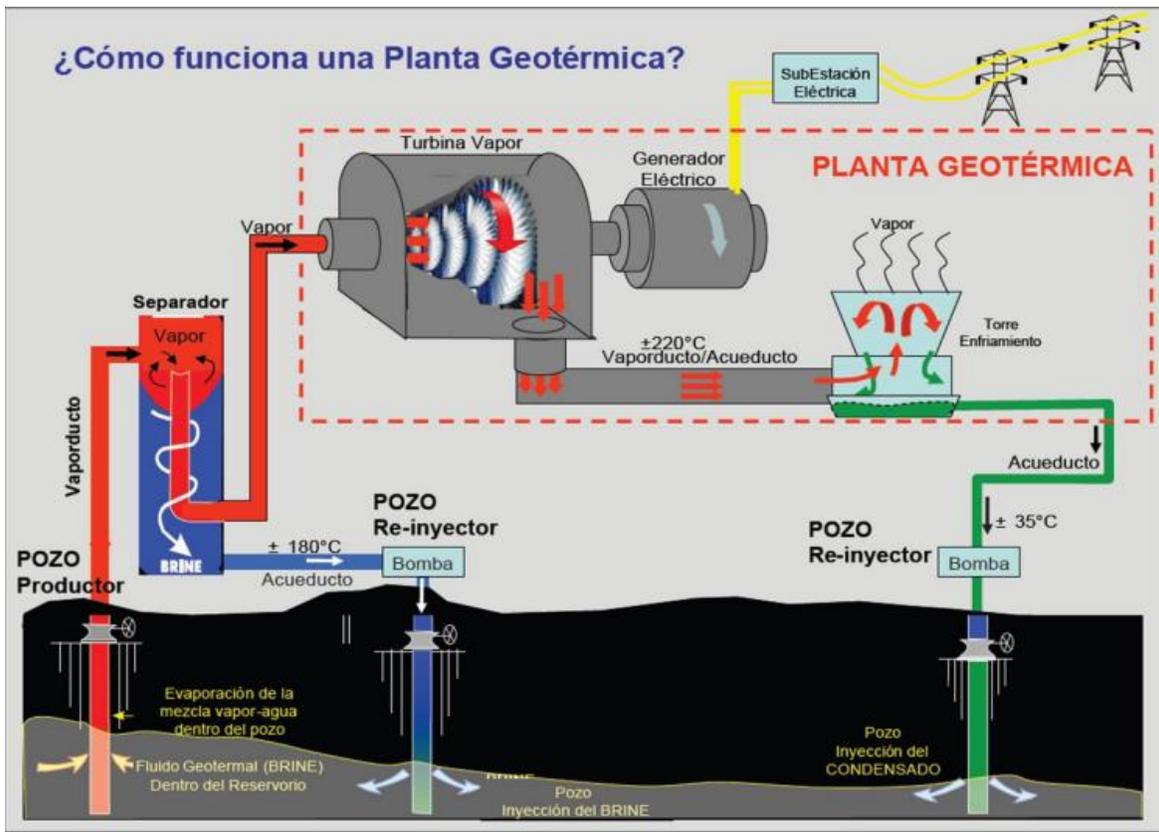


Figura 2.3 Modelo esquemático de Planta Geotérmica, p. 9. [18]

En la **Figura 1.3.** se muestra un modelo de planta geotérmica cuyo objetivo es generar electricidad. Como se observa, de manera general, del pozo productor se obtiene el geofluido que será a través de ductos pasa por el separador ciclónico con la finalidad de separar el fluido. Seguidamente, el vapor seco separado en el proceso anterior fluye a través de una turbina de vapor, el movimiento de la turbina es transmitida por un eje al generador eléctrico que finalmente genera la energía eléctrica. Cabe señalar que en virtud de disminuir el impacto ambiental se implementa los pozos inyectoros que cumplen la función de devolver el fluido geotermal al reservorio. Esta es la conformación de una central eléctrica de manera simplificada, más adelante se detallarán las diferencias entre las centrales de destello simple y las de ciclo binario.

1.5. Tipos de Plantas Geotérmicas para producción eléctrica

La generación eléctrica a partir de la conversión de la energía geotérmica es una forma de uso indirecto del recurso. Ahora se detallará 3 tipos de plantas geotérmicas que son de interés para la presente investigación.

1.5.1. Centrales de destello simple

Una central de destello simple presume de que el fluido geotermal pasará por un solo destello o flasheo en el ciclo de producción de energía. Si bien, este flasheo puede ocurrir en el reservorio, en el pozo de producción o en separador ciclónico; y su ubicación es importante para entender el proceso de conversión energética. Sin embargo, es irrelevante para el conocimiento de todo el sistema ya que para el entendimiento del sistema se asume que el geofluido comienza como un líquido comprimido en algún punto de la planta geotérmica y experimenta un cambio de fase en algún punto del sistema para que el vapor obtenido impulse a una turbina de vapor. Esta energía cinética transferida a la turbina permitirá el accionamiento del generador eléctrico que finalmente realizará la conversión a energía eléctrica.

La planta geotérmica de destello simple es la más utilizada en campos geotérmicos que son denominados por líquidos. A diciembre de 2014 se conocía que este tipo de tecnología constituía el 32% de las plantas geotérmicas y representaba el 43% de toda la potencia instalada por esta tecnología en el mundo [17].

A continuación, se explica todo el proceso en un esquema que incluye los principales componentes de la planta de destello simple. Cabe destacar que se utiliza la propia leyenda del gráfico para explicar su funcionamiento y componentes.

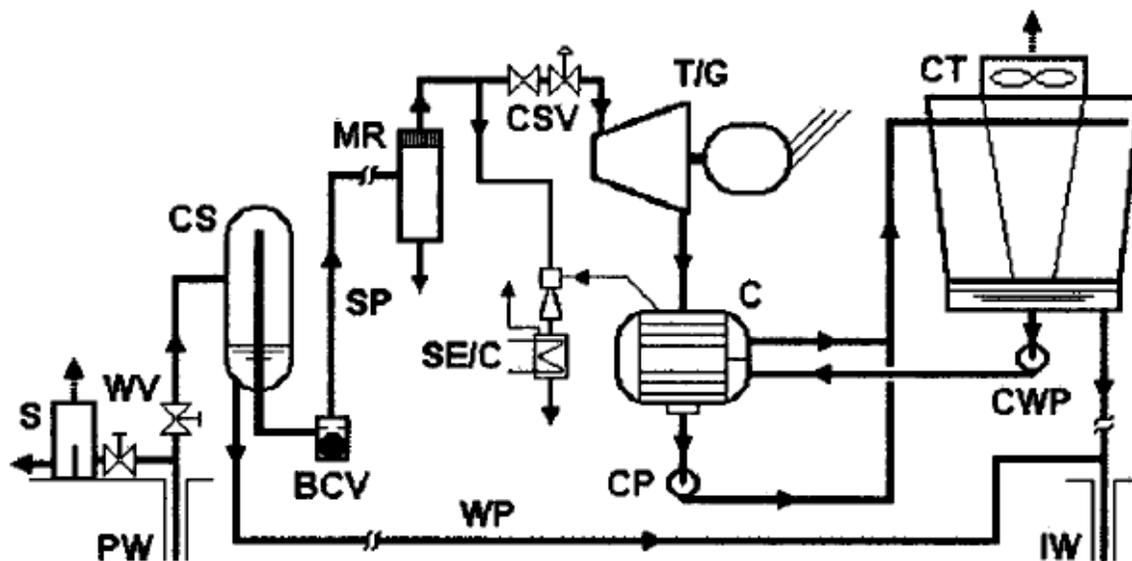


Figura 2.4 Esquema simplificado de una central de destello simple, p. 115. [16]

Como se observa en la **Figura 1.4** al drenar el pozo de producción (PW) se obtiene una mezcla de vapor y líquido suspendido, que se necesita separar en fase líquida y de vapor, con la menor caída de presión. Este proceso se utiliza un separador ciclónico vertical (CS) que separa las fases por diferencia de densidades del fluido geotermal. La importancia del proceso de separación incrementa el tiempo de vida útil del sistema en su conjunto, por lo que la calidad del vapor a la entrada de la turbina de vapor debe ser 99.995% de vapor seco para prevenir problemas la descamación y corrosión tanto de la tubería como los componentes de la turbina. Por otro lado, resaltar a componentes como el *Silencer* (S), las distintas válvulas (WV) y *ball check valve* (BCV) que son quipos de seguridad que previenen las sobrepresiones y distintas fallas que se ocasionar durante el flujo de geofluido de la boca de pozo a la casa de máquinas [16].

Análisis termodinámico

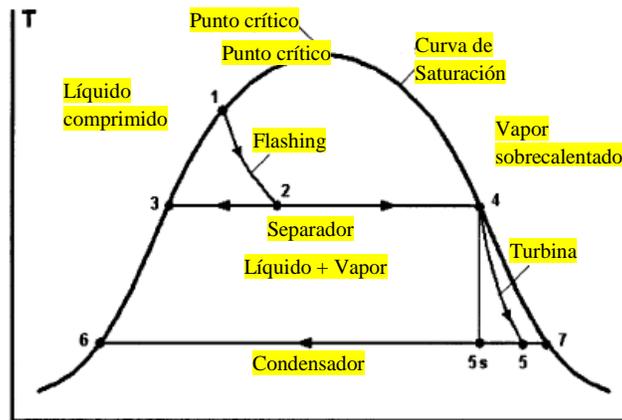


Figura 2.5 Diagrama de estado (Temperatura entropía) de central de destello simple, p. 120. [16]

Como se observa en la **Figura 1.5** el proceso de flasheo comienza con el geofluido bajo presión del reservorio en el estado 1. Al realizar el circuito completo en una planta geotérmica se obtiene un circuito cerrado dentro de la curva de saturación. Es decir, el proceso de destello (flasheo) se realiza a entalpía constante dado que ocurre de forma espontánea y esencialmente adiabática.

1.5.2. Centrales binarias

La principal diferencia de una central de ciclo binario con uno de destello simple radica en que el fluido de trabajo que pasa a través de la turbina no proviene de la fuente hidrotermal, sino que es una sustancia alternativa que puede ser orgánica, por ejemplo. El fluido de trabajo obtiene su calor del geofluido en una transferencia de energía generada en un intercambiador de calor. Los beneficios de este tipo de planta radican en que el geofluido puede ser de media o baja entalpía (<150 °C) y, debido a que el geofluido no tiene contacto con la turbina y otras superficies de generación, se minimizan los costos de selección de turbina. Asimismo, se debe resaltar que este tipo de plantas son una solución en la explotación del recurso geotérmico cuando este presenta alto contenido de gases disueltos y corrosivos [16].

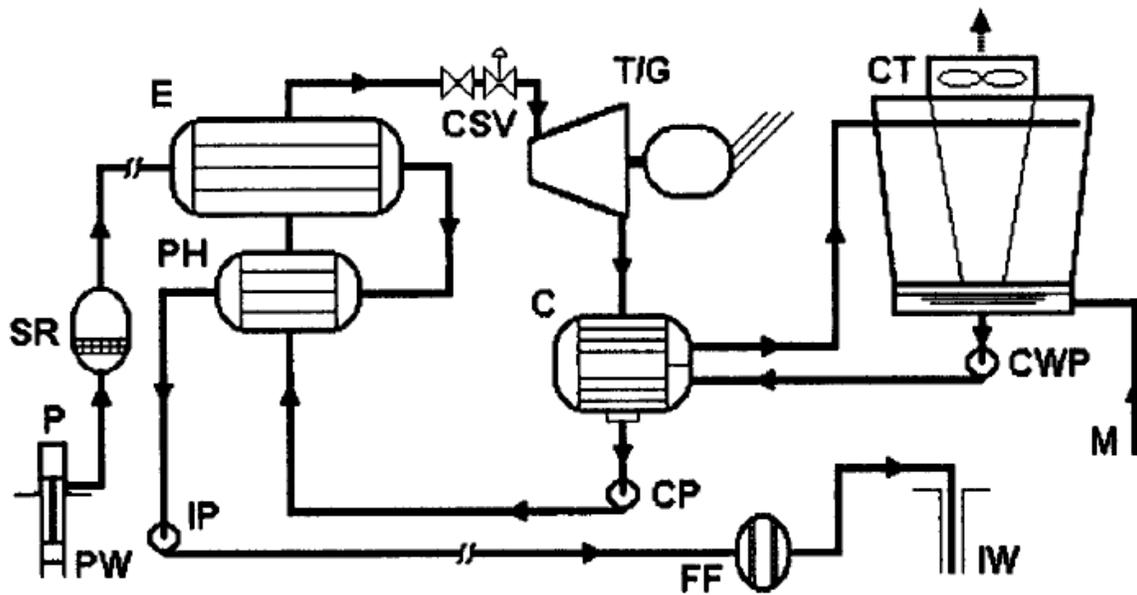


Figura 2.6 Esquema simplificado de una central de ciclo binario, p. 196. [16]

La **Figura 1.6.** presenta un esquema simplificado de una planta de ciclo binario en el cual se observa un en un evaporador (E), un precalentador (PH), distintas válvulas de control y de seguridad (CSV), la turbina (T/G), el generador (C), un condensador (CT) y una bomba de alimentación (CP) [16].

Cabe destacar que en este tipo de plantas es crítica la selección del fluido de trabajo. Si bien, el fluido suele ser un refrigerantes o hidrocarburos tales como el isobutano, isopentano y propano, es importante considerar sus propiedades ya que esto determinará el funcionamiento de la central geotérmica. Así también, dado los impactos en la salud, la seguridad y el medio ambiente importante sopesar holísticamente todos estos criterios al momento de elección del fluido del ciclo binario.

1.5.3. Centrales de Boca de Pozo

Es importante resaltar que las centrales geotérmicas, sean las centrales de destello simple y las de ciclo binario tienen un tiempo prolongado de entre la perforación de los primeros pozos productores, sin considerar a los pozos exploratorios, hasta el comienzo de las obras civiles definitivas, este tiempo suele extenderse entre los 3 a los 10 años. Además,

considerando que el costo por pozo geotérmico puede exceder al millón de dólares, se ha desarrollado una tecnología denominada como Plantas portátiles de Boca de Pozo o modulares. El rango de potencia instalada de esta tecnología oscila entre los 3000 a 20000 kWe y pueden usarse para evaluación el potencial de un campo geotérmico *in situ* mientras se explota el pozo para generación eléctrica, amortiguando los costos finales de una planta geotérmica [19].

De las centrales de boca de pozo se tiene a los siguientes:

- **Centrales de Flujo total**

Este tipo de plantas no requieren de una infraestructura complicada para su operación, por lo que permite la reducción substancial del tiempo entre el cual se encuentra el recurso y su explotación económica. Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de tecnología es la falta de experiencia con respecto a la operación y mantenimiento [19].

- **Centrales modulares de condensación**

Este tipo de central modular es más eficiente que la de descarga atmosférica. El costo por kW instalado es casi el doble que las del tipo portátil sin condensación. Actualmente, el mercado ofrece centrales hasta de 5 MWe.

- **Centrales de Descarga atmosférica**

Este tipo de plantas es la más usada en el mercado, se pueden encontrar con potencias de hasta 10 MW. La ventaja de estas plantas es que se venden en paquete, por lo que su instalación puede ser relativamente rápida. El costo por kW instalado de esta tecnología es menor que un central de condensación, pero menos eficiente, porque requieren mayor consumo específico de vapor.

1.5.4. Desempeño de una planta de generación

Dado que dentro de una planta geotérmica el geofluido pasa por una serie de procesos, es importante calcular la eficiencia del ciclo térmico (η_{te}) que mide la conversión del trabajo disponible en el geofluido a trabajo útil, es decir, electricidad. Para este cálculo se considera un ciclo cerrado en el cual el geofluido fluye desde los pozos productores hasta la salida de la planta de generación [16].

Así, para calcular la eficiencia de centrales de potencial geotérmico se tiene la **ecuación 1.1**.

$$\eta_{te} = \frac{W}{\dot{m} \cdot E} \quad (1.1)$$

Donde:

η_{te} : Eficiencia de aprovechamiento de recurso geotérmicos.

W : Potencia eléctrica entregada a la red, W.

\dot{m} : Caudal másico total de geofluido, kg/s.

E : Energía específica del geofluido bajo condiciones de yacimiento, J/kg.

Considerando que las condiciones del reservorio geotérmico varían dependiendo de distintas variables, a continuación, se presenta la ecuación general de evaluación de desempeño de la energía específica del geofluido, **ecuación 1.2**.

$$E = h_{(P_1, T_1)} - h_{(P_0, T_0)} - T_0(S_{(P_1, T_1)} - S_{(P_0, T_0)}) \quad (1.2)$$

$h_{(P_1, T_1)}$: Entalpía específica en estado estacionario, J/kg.

$h_{(P_0, T_0)}$: Entalpía específica a condiciones de la planta de generación, J/kg.

T_0 : Temperatura de diseño de planta de generación, K.

$S_{(P_1, T_1)}$: Entropía específica en estado estacionario, J/kg - K.

$S_{(p_0, T_0)}$: Entropía específica a condiciones de la planta de generación, $J/kg - K$.

1.6. Potencial geotérmico peruano

El Perú tiene una breve historia de desarrollo geotérmico que data del año 1970 cuando el Ingemmet realizó el primer inventario de manifestaciones geotermales en el país [8]. Pero no fue hasta el año 2012 cuando se presenta el Plan Maestro de Desarrollo Geotérmico en Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en cual se plantea un horizonte para la promoción del desarrollo geotérmico en el Perú, buscando que este recurso renovable sea explotado en beneficio del pueblo peruano y con propuestas que estén en concordancia con el marco legal preexistente.

Dentro del Plan, mencionado anteriormente, se estimó que la potencia geotermal en el Perú es de 2860 MWe. El cálculo de este potencial se realizó por el denominado como Método Volumétrico cuya característica es que puede estimar los potenciales geotérmicos a partir de información con alta incertidumbre, con aproximación estadística. Finalmente, cabe destacar que el país se encuentra dividido en seis regiones geotermales.

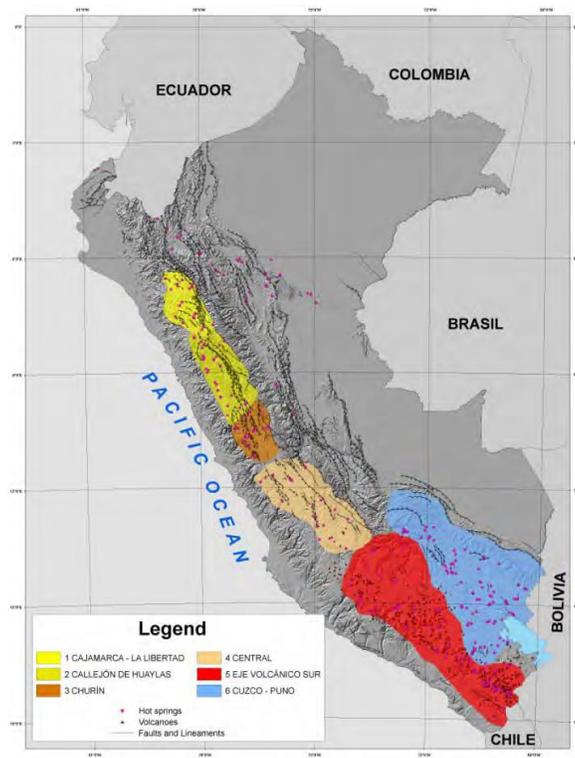


Figura 2.7 Mapa geotérmico del Perú [7]

1.6.1. Eje Volcánico del Sur

En específico, una región geotermal denominada como Eje Volcánico del Sur (Región 5), que comprendía 25 campos geotérmicos y alcanzaba un potencial de 1597 MWe, representa el 57% del potencial geotérmico peruano [7]. En específico, de todo potencial geotérmico peruano, se identificaron cinco zonas geotermales que representan el 14,69% del potencial geotérmico. Estos campos fueron los denominados como Calientes, Borateras, Chugara-Kallapuma, Ancocollo y Tutupaca ubicadas en la región Tacna [8]. En la tabla 1.2. se puede observar el potencial promisorio que se encuentra en la región Tacna.

Región geotérmica	Región política	Nombre del campo	Potencial del recurso (MWe)
Eje volcánico del Sur	Tacna	Calientes	100
	Tacna	Borateras	40
	Tacna	Chugara-Kallapuma	84
	Tacna	Ancocollo	98.2
	Tacna	Tutupaca	113.8
		Total	420

Tabla 2.2 Potencial geotérmico del Eje Volcánico del Sur. [7]

Cabe destacar que desde el año 2015, en cumplimiento de sus atribuciones, el Ingemmet continuo con su caracterización de los recursos geotérmicos de la zona sur, en específico, en el campo geotérmico Casiri-Kallapuma; sus estudios los llevaron a concluir en 2018 que el potencial eléctrico de este campo es de 207 MWe [7], [8].

1.7. Mercado eléctrico

El mercado eléctrico peruano es un sistema interconectado que trabaja con el objetivo de optimizar la operación del sistema al menor costo. Buscando este objetivo, el sistema se ha conformado por distintos actores como los generadores, transmisores, distribuidos, clientes libres y clientes regulados. El amparo legal de todo este sistema está estipulado en la Ley de Concesiones Eléctricas (Ley N° 28832) y los reglamentos y procedimientos técnicos del operador del sistema, el COES.

Dentro de este mercado se utilizan conceptos como:

- Costo marginal: Se define como el costo o ahorro en que se incurre al producir o dejar de producir una unidad adicional de energía (USD / MWh) Este monto permite efectuar las transacciones comerciales en el Mercado Spot o también llamado “mercado de corto plazo”, un espacio definido por la Ley de concesiones Eléctricas (Decreto Ley N° 25844) para la transfieren volúmenes entre los generadores, distribuidores y usuarios libre.
- Costo total de operación del sistema: Es el mínimo costo logrado en el despacho de las unidades eléctricas del sistema que cumple con las restricciones e inflexibilidades operativas de las unidades de generación⁸. De tal manera que se cumple con el objetivo de maximizar el uso del recurso energético como el hidráulico, fósil y renovable [20]. En el caso del peruano, se debe considerar adicionalmente el reglamento de la Ley 1002, “Ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables”, que establece la prelación de despacho de unidades de generación que utilicen energías renovables o la tecnología de cogeneración.
- Energía firme: Es la máxima producción posible de energía eléctrica, determinada para una probabilidad de excedencia de noventa y cinco por ciento (95%) para las unidades de generación hidroeléctrica y de indisponibilidad, programada y fortuita, para las unidades de generación térmica [20]. No existe una definición para las centrales de generación geotérmicas, pero técnicamente pueden operar como unidades de generación hidroeléctrica.
- Centrales de Generación Eficiente: Se refiere a las centrales eléctricas que “operan en base”, es decir, con un alto factor de planta que oscila entre el 85% y 95%, así también, poseen capacidad de regulación de frecuencia y sus costos de operación son cero o próximos a cero [20]. Las centrales de generación con energía geotérmica son un ejemplo de este tipo de centrales ya que cumple con las características técnicas de la definición.

⁸ Las inflexibilidades operativas del sistema son costos de arranque, mínimas potencias de generación, mínimo tiempo de operación, entre otros

- Precio monómico: Es un precio de integración de los costos de producción de la energía y costo de potencia en horas de punta y fuera de punta de la demanda [20]. Este precio busca mejorar el entendimiento de los precios vinculados al mercado eléctrico, ya que este concepto se puede explicar la recuperación tanto los costos de la inversión hecha por la central de generación, así como cubrir sus costos de operación y mantenimiento, en un periodo dado, típicamente de veinte (20) años.

1.8. Marco legal

a. Ley Orgánica del recurso geotérmico

El aprovechamiento del recurso geotérmico se rige por la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos (Ley N° 26848) promulgada en febrero de 1997. Esta norma rige el aprovechamiento del suelo y el subsuelo del territorio nacional que está relacionada al recurso geotérmico. La materialización de esta ley es su último reglamento, Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos (D.S: 19-2010 E-M)

En estas normas, en concordancia con la Ley de concesiones eléctricas promueve la inversión privada para la explotación del recurso geotérmico y tiene como finalidad abastecer de energía de forma local y en beneficio de las poblaciones aledañas a estas manifestaciones naturales. Se reconoce que los derechos de exploración y explotación del recurso geotérmico se otorgan a través de los instrumentos de autorización o concesión.

Finalmente, este marco legal establece las responsabilidades de las instituciones peruanas como el Ministerio de Energía y Minas para elaborar, proponer y aplicar la política del sub-sector, así como dictar las demás normas pertinentes. Finalmente establece que el Organismo Supervisor de Inversión en Energía y Minas es el encargado de velar y fiscalizar el cumplimiento de la ley peruana.

b. Ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con Recursos Energéticos Renovables

El decreto Legislativo N°1002, establece que establece que la generación eléctrica con recursos geotérmicos deberá tener prioridad para el despacho diario efectuado en la prelación establecida por el operador del sistema [3]. Así también se establece que dentro de los planes se considerará la potencia que ofrece la generación con recurso geotérmico para lograr los objetivos de generación eléctrica con recurso renovable.

c. Facilidades de exploración geotérmica por entidades públicas

Según el Decreto Supremo N° 016-2008- EM, se establece que las entidades del Estado como el Ingemmet puede participar en la fase de exploración de recursos geotérmicos. En búsqueda de fomentar y orientar posteriormente inversiones eficientes del sector privado en la actividad de explotación geotérmica.

CONCLUSIONES

Cabe aclarar que las conclusiones que se presentan a continuación están de acuerdo con la recopilación de información.

1. Se decide realizar el estudio en el campo Casiri-Kallapuma a razón de que este es el último campo del que se tiene información actualizada por el Ingemmet. Asimismo, en la región Tacna se encuentra el 14,68% del potencial geotérmico del país. Finalmente, Tacna es una de las regiones de la zona sur que serán afectadas por el déficit de generación eficiente.
2. Para el diseño preliminar de una planta de generación se recomienda evaluar las tecnologías de destello simple y de boca de pozo por los bajos costos de ambas tecnologías.
3. Se observa un alto potencial de generación eléctrica en el sur del país a partir de centrales geotérmicas, lo que permitiría cubrir el déficit de generación eficiente en el Sur, pero faltan mayores estudios sobre los costos y tiempos de implementación de dichas tecnologías.
4. Finalmente, las investigaciones que se realicen en base a la información de los boletines del Ingemmet tienen una alta incertidumbre, a razón de los datos superficiales que esta institución recolecta para la elaboración de sus informes.

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a mi familia, amigos y profesores que me apoyaron en la elaboración de este trabajo. Sé que en el futuro me sentiré feliz de haber logrado el grado de bachiller en la UTEC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. del consejo de M. [PCM], *Ley que afianza la seguridad energética y promueve el desarrollo de polo petroquímico petroquímico en el sur del país*, vol. 66. PERU, 2012, pp. 37–39.
- [2] [COES-SINAC] Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional, “Evaluación de la necesidad de generación eficiente en el SEIN y prospectiva del suministro del sur en el corto, mediano y largo plazo.” [Online]. Available: <https://www.coes.org.pe/Portal/planificacion/otrosestudioslp>.
- [3] COES SINAC, “Informe de la operación anual del SEIN 2020,” p. 24, 2020.
- [4] UCPS and MEF, “Elaboración de la nueva matriz energética sostenible y evaluación ambiental estratégica, como instrumentos de planificación,” 2012.
- [5] Congreso de la República del Perú, “Política Energética Nacional del Perú 2010 - 2040,” *EL Peru.*, p. 6, 2010.
- [6] B. Matek and S. Brian, “The Values of Geothermal Energy : A Discussion of the Benefits Geothermal Power Provides to the future U.S. power system,” 2013. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/GRC2001/the-values-of-geothermal-energy-a-discussion-of-the-benefits-geothermal-power-provides-to-the-future-us-power-system>.
- [7] Ministerio de Energía y Minas [MINEM], “Plan Maestro Para El Desarrollo De La Energía Geotérmica En El Perú,” 2012. [Online]. Available: http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12048567.pdf.
- [8] V. Cruz Paucara and Xi. Guardia, “Geothermal Country Update for Peru, 2010-2014,” *World Geotermal Congress 2015*, no. April. p. 9, 2015.
- [9] V. Cruz Paucara, R. Flores Jacobo, and E. Velarde Benavente, Yuliana Condori Mamani, “CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL

GEOTÉRMICO DE LA ZONA GEOTERMAL CASIRI-KALLAPUMA,” 2018.

- [10] LAZARD, “Lazard’s levelized cost of energy analysis — version 14.0,” no. October, pp. 0–20, 2020.
- [11] COES SINAC, “Evaluación de la necesidad de generación eficiente en el SEIN y prospectiva del suministro eléctrico del sur en el corto, mediano y largo plazo,” 2018. .
- [12] L. Córdova, “Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW,” 2010. [Online]. Available: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/884>.
- [13] J. Apaza and J. Olazábal, “La energía geotérmica como alternativa económica y sostenible para solucionar el déficit de generación eléctrica en la zona Sur del Perú.,” *UNI*, 2014. [Online]. Available: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/12434>.
- [14] COES, “Informe de Diagnóstico de las Condiciones Operativas del SEIN Periodo 2021 - 2030,” p. 395, 2019.
- [15] M. H. Dickson and M. Fanelli, “Geothermal Energy.” 1995.
- [16] R. DiPippo, *Geothermal Power Plant Principles, Applications, Case Studies and Environment Impact*. 2016.
- [17] M. A. Grant and P. F. Bixley, *Geothermal Reservoir Engineering 2Nd Edition*. 2000.
- [18] V. C. Pauccara, “Energía Geotérmica : alternativa de energía renovable, limpia y con visión a futuro.” [Online]. Available: http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/SEMINARIOGEOTERMIA/ENERGIA_GEOTERMICA_RENOVABLE- V_CRUZ-INGEMMET.pdf.
- [19] OLADE, “Metodologías de exploración y explotación geotérmica Fase de desarrollo y explotación,” 1981.
- [20] Osinergmin, “Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas - DS N° 009-93-EM,” p. 103, 1993.