



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO
TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA**

AUTOR

Kevin Josue Soto Lavayen

TRABAJO DE TITULACIÓN
Previo a la obtención del grado académico en
MAGISTER EN PETRÓLEOS

TUTOR

Ing. José Villegas Salabarría, PhD

Santa Elena, Ecuador

Ecuador Año

2025



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Econ. Roxana Álvarez Acosta, PhD
COORDINADORA (E) DEL
PROGRAMA

Ing. José Villegas Salabarría, PhD .
TUTOR

Ing. Xavier Vargas Gutierrez, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Sadi Iturralde Kure, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ab. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por el Ing KEVIN JOSUE SOTO LAVAYEN, como requerimiento para la obtención del título de Magister en Petróleos.

TUTOR

Ing. José Villegas Salabarría, PhD.

22 días del mes de enero del año 2025



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Kevin Josue Soto Lavayen**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, (Diseño y Simulación de Pozos Geotérmicos para la Optimización de la Extracción de Energía) previo a la obtención del título en Magister en Petróleos, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, a los 22 días del mes de enero del año 2025

EL AUTOR

Kevin Josue Soto Lavayen

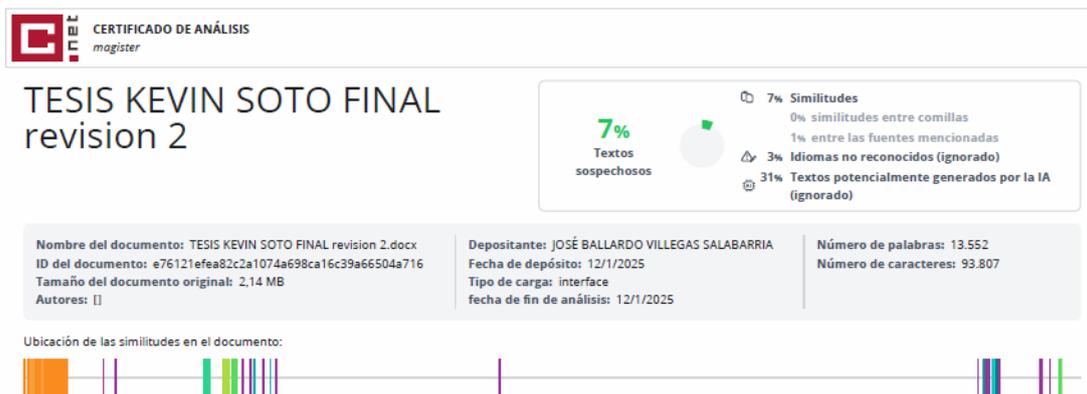


UPSE

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado (Diseño y Simulación de Pozos Geotérmicos para la Optimización de la Extracción de Energía), presentado por el estudiante, Kevin Josue Soto Lavayen fue enviado al Sistema Antiplagio Copilation, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 7%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. José Villegas Salabarría, PhD.



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, Kevin Josue Soto Lavayen

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Santa Elena, a los 22 días del mes de enero del año 2025

EL AUTOR

Kevin Josue Soto Lavayen

AGRADECIMIENTO

Primero agradecer a Dios por permitirme tomar este nuevo reto en mi formación académica.

A mis docentes que a lo largo de este tiempo de estudio han compartido sus enseñanzas y a mis compañeros por copartir sus experiencias durante nuestro periodo académico.

Al Ing José Villegas por su incondicional apoyo y brindándome los saberes para la culminación de este proyecto.

Kevin Josue Soto Lavayen

DEDICATORIA

A Dios por permitir culminar una meta mas en mi vida

A mis padres por el apoyo incondicional, por darme los ánimos para seguir consiguiendo nuevas metas y a mis hermanos por estar presentes durante todo este tiempo.

Kevin Josue Soto Lavayen

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
Introducción	1
Problemática	2
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
Introducción a la Energía Geotérmica	4
Definición y Tipos de Energía Geotérmica	10
Historia y Evolución de la Energía Geotérmica	13

Importancia y Beneficios de la Energía Geotérmica.....	13
Principios Fundamentales del Recurso Geotérmico.....	16
Gradiente Geotérmico	16
Transferencia de Calor en el Subsuelo	16
Propiedades Termodinámicas de los Fluidos Geotérmicos	17
Clasificación de los Sistemas Geotérmicos.....	17
Reservorios Geotérmicos.....	17
Comportamiento Del Gradiente en Función de la Litología.....	18
Presión y Permeabilidad Del Reservorio	18
Reinyección de Fluidos Geotérmicos	19
Factores que Afectan el Gradiente Geotérmico.....	19
Balance de Energía y Conservación Del Calor	19
Geología y Tipos de Reservorios Geotérmicos	20
Transferencia de Calor	21
Evaluación del Potencial Geotérmico.....	22
Diseño de Pozos Geotérmicos	23
Diseño de Intercambiadores de Calor en Pozos Coaxiales.....	23

Guías Técnicas para Sistemas de Intercambio Geotérmico de Circuito Cerrado	24
Selección del Sitio de Perforación.....	24
Geología.....	24
Evaluación del recurso	25
Tipos de perforaciones	26
Construcción y Completación del Pozo.....	27
Materiales de tuberías.....	28
Diseño de la terminación del pozo.....	29
Componentes clave del diseño de terminación	30
Revestimientos(casing):	30
Cementación:.....	30
Técnicas de Terminación del pozo.....	31
Control Del flujo en la terminación.....	31
Simulación de Pozos Geotérmicos	31
Modelado Matemático de Pozos Geotérmicos	32
Herramientas y Software de Simulación.....	33
Optimización de la Extracción de Energía.....	36

Estudio de temperatura y presión	36
Gestión Del Flujo de Fluidos Geotérmicos.....	36
Evaluación de permeabilidad.....	37
CAPITULO III: METOLOGÍA.....	38
Contexto de la investigación	38
Tipo de investigación.....	38
Población y Muestra.....	39
Parámetros del Sistema	40
Modelado Matemático	40
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
Principios Fundamentales.....	44
<input type="checkbox"/> Gradiente Geotérmico	44
<input type="checkbox"/> Reservorios Geotérmicos.....	45
<input type="checkbox"/> Transmisión Calor-Subsuelo.....	45
<input type="checkbox"/> Tipos de Energía Geotérmica.....	45
Fuente Renovable	45
Eficiencia y Balance energético	46
Impacto Ambiente Bajo.....	46

Técnicas	46
Potencial y aplicación.....	46
Sostenibilidad.....	47
Simulación.....	47
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	58
Bibliografía.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1:	4
Ilustración 2 :	5
Ilustración 3:	6
Ilustración 4:	7
Ilustración 5:	9
Ilustración 6:	10
Ilustración 7:	11
Ilustración 8:	12

RESUMEN

La energía geotérmica representa una oportunidad clave para diversificar la matriz energética en Ecuador, dada su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico. Este estudio aborda el diseño y simulación de pozos geotérmicos, enfocándose en la optimización de la extracción de energía. A través de simulaciones numéricas, se analizaron variables críticas como gradientes térmicos y de presión, evaluando la interacción entre fluido y reservorio.

La metodología incluyó la evaluación de sistemas de alta y baja entalpía, el diseño de terminación de pozos y estrategias de reinyección para garantizar la sostenibilidad del recurso. Los resultados muestran que una gestión adecuada de fluidos y el uso de tecnologías avanzadas optimizan la eficiencia energética y minimizan impactos ambientales. Este trabajo establece bases técnicas para promover la energía geotérmica como una solución renovable y sostenible en Ecuador.

Palabras claves: Energía geotérmica, pozos geotérmicos, simulación

ABSTRACT

Geothermal energy represents a key opportunity to diversify Ecuador's energy matrix, given its location in the Pacific Ring of Fire. This study addresses the **design and simulation of geothermal wells**, focusing on optimizing energy extraction. Through numerical simulations, critical variables such as thermal and pressure gradients were analyzed, evaluating the interaction between fluid and reservoir.

The methodology included the evaluation of high- and low-enthalpy systems, well completion design, and reinjection strategies to ensure resource sustainability. The results show that proper fluid management and the use of advanced technologies optimize energy efficiency and minimize environmental impacts. This work establishes a technical foundation to promote geothermal energy as a renewable and sustainable solution in Ecuador.

Keywords: Geothermal energy, geothermal wells, simulation.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Introducción

La energía geotérmica se ha consolidado como una fuente de energía renovable y sostenible, y tiene un gran potencial para ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y a reducir el impacto en el cambio climático. La utilización de la energía geotérmica no solo proporciona una fuente de energía constante y confiable, sino que también proporciona importantes beneficios ambientales.

A pesar de sus beneficios, la explotación efectiva de los recursos geotérmicos requiere un diseño y simulación precisos de los pozos geotérmicos, que son componentes esenciales del proceso de extracción de energía.

El diseño de pozos geotérmicos implica una serie de desafíos técnicos, incluida la selección del sitio, la perforación, la gestión de fluidos y el control de la temperatura en conjunto con la presión dentro del pozo.

Para maximizar la eficiencia y la viabilidad económica de los proyectos geotérmicos, estos factores son esenciales. Por otro lado, la simulación de pozos facilita la toma de decisiones informadas durante las etapas de planificación y operación al predecir el comportamiento del sistema geotérmico bajo una variedad de condiciones operativas y de subsuelo.

En Ecuador, la energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable más prometedoras, pero aún no se ha utilizado adecuadamente. Debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, esta nación tiene un gran potencial para el desarrollo de proyectos geotérmicos. El Ecuador tiene una oportunidad única para explotar esta fuente de energía sostenible debido a sus características geotérmicas, que incluyen una gran cantidad de volcanes activos y sistemas hidrotermales.

La energía geotérmica es una opción atractiva para diversificar la matriz energética del país porque proporciona una producción continua y estable, independientemente de las condiciones climáticas, a diferencia de otras fuentes renovables como son la solar y la eólica.

El presente estudio tiene como objetivo los modelos de diseño y simulación de pozos geotérmicos enfocados en la optimización de la extracción de energía. Se utilizarán herramientas de simulación numérica y métodos de modelado computacional para evaluar el rendimiento de la configuración del pozo y condiciones de operación. Para encontrar métodos que maximicen la eficiencia energética y minimicen los efectos ambientales, se analizarán factores como la geometría del pozo, la interacción fluidoroca y los métodos de reinyección de fluidos.

Este estudio contribuirá al campo de la ingeniería geotérmica proporcionando un marco teórico y práctico para el diseño optimizado de pozos geotérmicos, respaldado por simulaciones detalladas y análisis cuantitativos. Los resultados obtenidos serán de utilidad tanto para investigadores como para profesionales de la industria geotérmica, ofreciendo directrices claras y basadas en evidencia para mejorar los procesos de extracción de energía y fomentar el desarrollo sostenible de los recursos geotérmicos

Problemática

En la actualidad el incremento en la necesidad de fuentes de energía sustentables y respetuosas con el entorno ha fomentado la investigación y el avance de tecnologías que utilicen el potencial de los recursos geotérmicos. Ecuador, ubicado en una zona geológicamente activa, posee significativos recursos geotérmicos que podrían ser utilizados para cubrir una porción de esta necesidad de energía. No obstante, la obtención de energía geotérmica plantea desafíos técnicos y financieros que complican su puesta en marcha a gran escala (IRENA, 2017).

Uno de los retos más significativos en el diseño y explotación de pozos geotérmicos es la optimización del proceso de obtención de energía. Este proceso se ve afectado por factores como las propiedades geológicas del subsuelo, la temperatura y la presión, además de las

condiciones particulares del pozo. La ausencia de modelos de simulación exactos y adaptados a las circunstancias locales restringe la habilidad para anticipar el desempeño y eficacia de los pozos, creando dudas acerca de la factibilidad y la sostenibilidad de la explotación geotérmica (IRENA, 2020).

La falta de investigaciones y modelos concretos para el entorno geotérmico de Ecuador complica la puesta en marcha de estrategias optimizadas para incrementar la obtención de energía y reducir el efecto en el medio ambiente. Frente a este desafío, surge la necesidad de diseñar y simular pozos geotérmicos a través de modelos que tomen en cuenta las particularidades de la región. Esto facilitaría la optimización de la obtención de energía geotérmica y fomentaría la creación de una fuente de energía renovable, sustentable y de menor impacto ambiental en Ecuador (Gurbuz et al., 2023).

Objetivo General

Desarrollar un modelo optimizado de pozo geotérmico que mejore la eficiencia en la extracción de energía

Objetivos Específicos

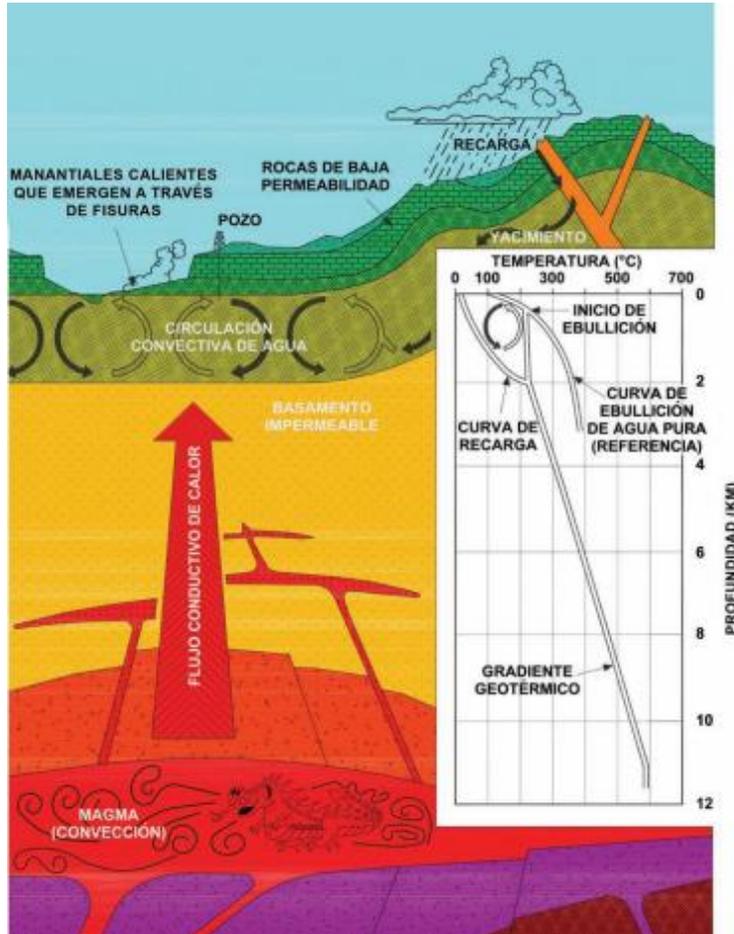
- Analizar los principios fundamentales de la energía geotérmica, destacando su potencial como fuente sostenible de energía renovable.
- Simular el comportamiento del modelo de pozo geotérmico propuesto para evaluar su eficacia en la extracción de energía, utilizando variables como temperatura, presión y flujo de fluidos.
- Investigar las variaciones de las gradientes de temperatura a diferentes profundidades en el subsuelo para determinar su impacto en la eficiencia de la extracción de energía.
- Evaluar la viabilidad ambiental y sostenibilidad de la implementación de pozos geotérmicos en Ecuador, considerando tanto los beneficios como los potenciales impactos ambientales.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Introducción a la Energía Geotérmica

Ilustración 1:

Sistema Geotermico

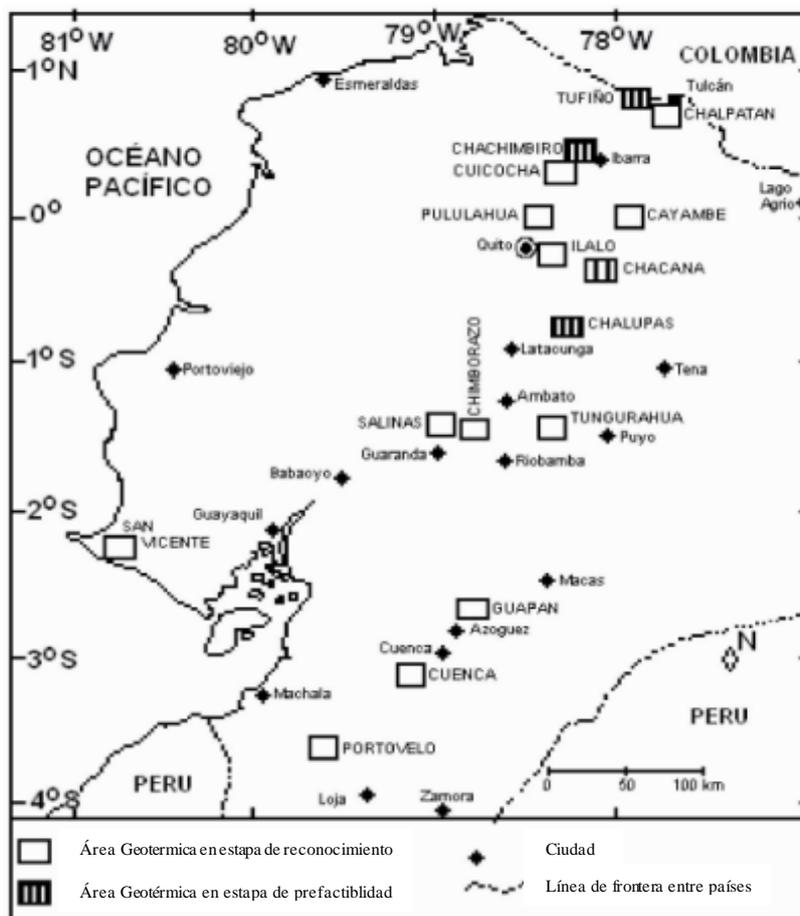


Fuente: (Santoyo y Barragán, 2010)

El término "geotermia" proviene de los términos griegos "geo", que significa "tierra", y "therm", que significa "calor". El calor que se almacena en el interior de la tierra y se origina en el núcleo del planeta debido a su composición de hierro fundido y níquel, que se encuentra a una profundidad de aproximadamente 6000 km de la corteza. Se cree que el núcleo de la Tierra alcanza los 5000 °C, el calor que sale del núcleo interno y calienta las capas exteriores (núcleo externo, manto y corteza). El "magma" es el término utilizado para describir cómo este calor se expulsa de la corteza (Rodríguez Vargas y Matinez Lizarazo, 2023).

Ilustración 2 :

Mapa de Ecuador con los proyectos geotérmicos para generación eléctrica

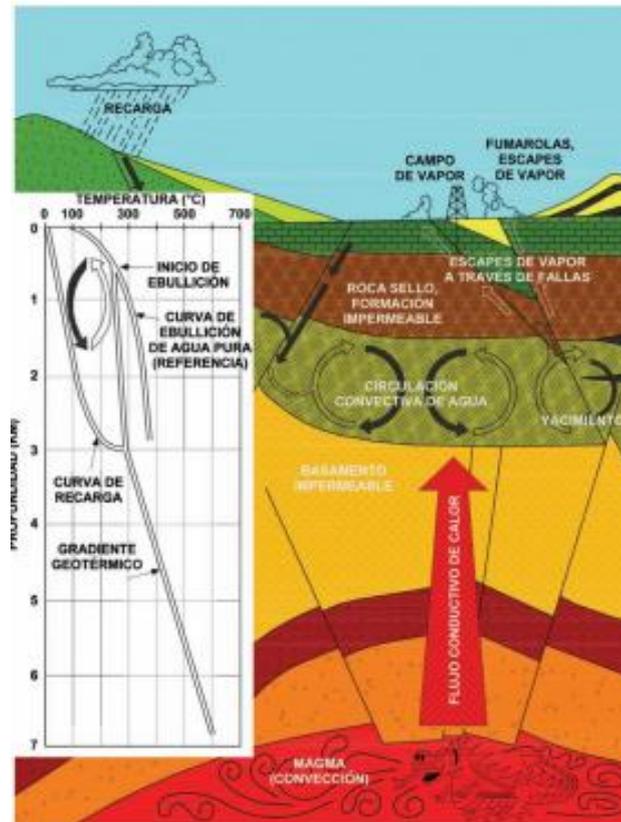


Fuente: Adaptado de (MEER, 2010)

La energía geotérmica según el Consejo de Energía Geotérmica (EGEC) la define como una fuente renovable que se encuentra almacenada en forma de calor en el subsuelo o la capa superficial de la tierra. El calor almacenado puede ser proveniente de rocas, aguas subterráneas, aguas termales, suelo húmedo o seco, independiente de la profundidad y la temperatura a la que se encuentren (Trillo & Angulo, 2008).

Ilustración 3:

Sistema Geotermico



Fuente: (Santoyo y Barragán, 2010)

Esta energía puede ser usada en dos formas; la indirecta, donde el calor de la tierra es convertido en energía eléctrica, de modo que, el vapor que se produce debido al agua almacenada en rocas con temperaturas muy elevadas puede utilizarse para girar una turbina y así generar energía eléctrica. La forma directa donde se puede obtener diversas aplicaciones como; calefacción y refrigeración de ciertos espacios de acuerdo con los requerimientos en la industria, spas de salud, piscicultura, suelo radiante, climatizar ambientes usando radiadores entre otros (Sanchez, 2020).

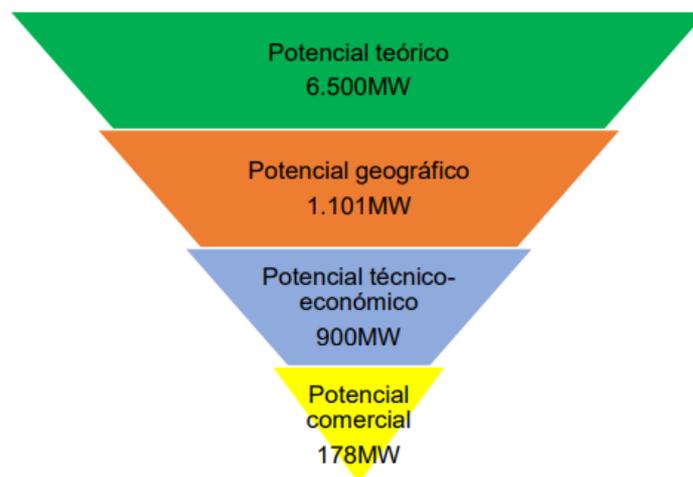
Los sistemas geotérmicos, son definidos por Marzolf (2014) como elementos naturales que pueden existir en una misma área, y posibilitan la extracción de calor, cuyos componentes principales son:

- Fuente de calor

La fuente de calor puede ser; un complejo de roca con alto calor por constante contacto con un sistema volcánico, también pueden ser gases a altas temperaturas de origen magmático. En general, la fuente de calor posee temperaturas más altas de los 600 °C.

Ilustración 4:

Pirámide jerárquica de potencial



Fuente: (Cañizares y Jácome , 2018)

- Reservorio geotérmico

Es una formación de rocas en donde puede haber paso de agua o fluido, en donde el calor puede ser explotado a bajas profundidades, lo que resulta más económico para los sistemas de generación.

- Sistema de suministro de agua

Es un sistema de roca fracturada, que posibilita la recarga del reservorio geotérmico con el agua infiltrada en el subsuelo.

- Capa sello

Es la roca impermeable, en general con presencia de arcillas, resultantes de la alteración de las rocas por la exposición o contacto por alta temperatura, evitando pérdida de agua y vapor.

- Fluido geotérmico

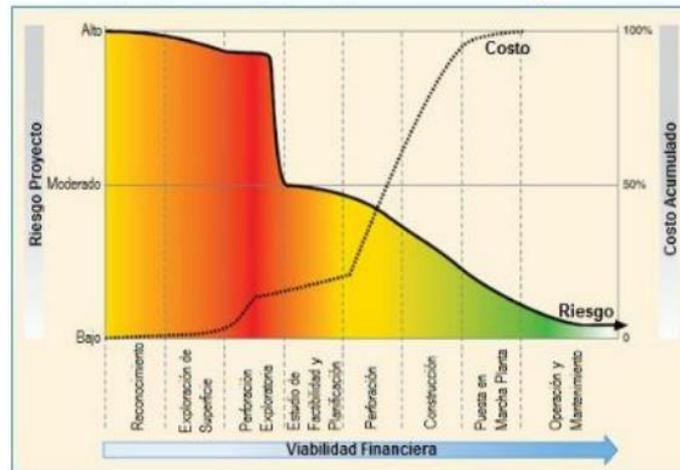
Se le define fluido geotérmico al agua líquida, al vapor o la combinación de estos, que se halla en el reservorio geotérmico y que se manifiesta en la superficie a través de pozos geotérmicos o manantiales.

Un sistema geotérmico es el conjunto de roca caliente que puede hallarse a una profundidad de entre 4 y 5 km de profundidad de la superficie de la tierra, la cual acumula energía que puede ser aprovechada para diversos fines con el apoyo de la tecnología. (Camargo, 2013).

Para hablar de gradiente geotérmico es preciso mencionar que el término se refiere al cómo varía la temperatura con relación a la profundidad de la corteza terrestre, la cual puede estar relacionada con la presencia de elementos químicos radiactivos en las rocas. (Matiz, 2018).

Ilustración 5:

Costos y riesgos en proyectos geotérmicos



Fuente: (CEPAL, 2016)

Así pues, los factores que pueden influir en el gradiente geotérmico son:

- La capacidad de conducir calor que tengan las rocas (mientras más conductividad térmica tengan las rocas, habrá menor gradiente geotérmico).
- Las reacciones químicas que haya en mayor grado en la zona (endotérmicas y exotérmicas)
- La existencia y cantidad de elementos radiactivos, que emanan calor a desintegrarse, incrementando el gradiente geotérmico y disminuyendo el grado geotérmico
- La cercanía con rocas eruptivas no se encuentra consolidadas todavía, pero proveen gran cantidad de calor.

Otros factores influyentes son:

- La presencia de aguas termales en el área de interés.
- La distancia de la zona de interés a las áreas oceánicas

Por lo general, en zonas normales para la obtención de una temperatura de 150°C, se requieren alcanzar profundidades de 4000m. No obstante, en zonas donde el flujo es anómalo, se presentan temperaturas entre 200°C y 300°C a profundidades relativamente bajas (1500-2500m). (Fernández, 2015).

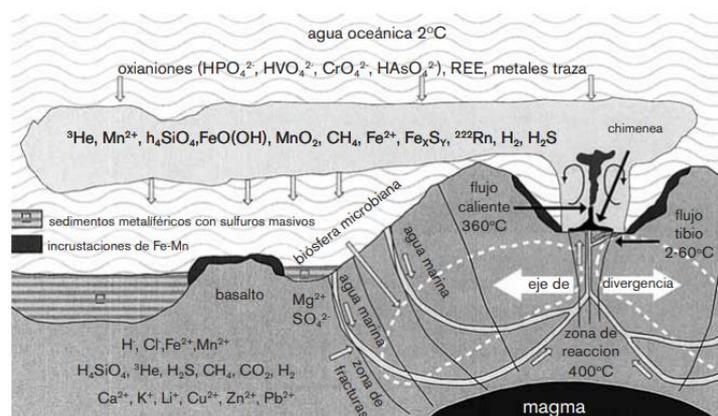
Definición y Tipos de Energía Geotérmica

Los sistemas geotérmicos existentes en la Tierra se clasifican, en forma general, con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca. Cuando la temperatura del fluido es mayor de 200 grados centígrados, se le considera un recurso de alta entalpía (o alto contenido energético), ideal para la producción de electricidad con sistemas convencionales de generación. Si las temperaturas del fluido están en el intervalo de 100 a 200 grados centígrados, o bien son menores de 100 grados centígrados, se les denomina sistema de mediana o baja entalpía, respectivamente (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010)

Sistemas hidrotermales

Ilustración 6:

Sistema Hidrotermal en dorsal



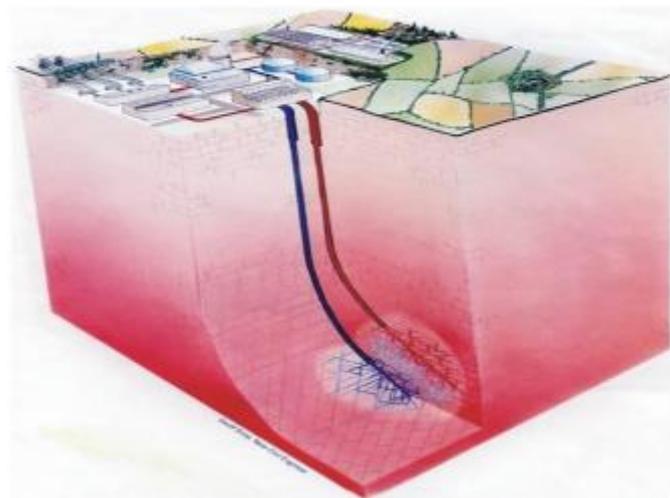
Fuente: (Pantója y Gómez, 2004)

Los sistemas hidrotermales desarrollan ensamblajes minerales complejos y las leyes, mineralogía, textura y naturaleza petrológica se distribuyen de forma muy heterogénea en el macizo. Estos minerales pueden identificarse en superficie utilizando teledetección hiperespectral, caracterizando alteraciones hidrotermales, litologías, estructuras tectónicas, halos geoquímicos de áreas extensas, más rápido y a menos costo (Rodríguez Delgado y Siccha Ruiz, 2022).

Sistemas de roca caliente seca

Ilustración 7:

Esquema de un yacimiento geotérmico de Roca Seca Caliente



Fuente: (Quijano, 2011)

Según Reyes Faustino, en el año 1993, mediante su investigación sustenta que en la naturaleza abundan las masas de roca seca y caliente (RSC) con una gran cantidad de energía geotérmica almacenada desde hace millones de años, esta no es fácil de extraer debido, principalmente a dos razones:

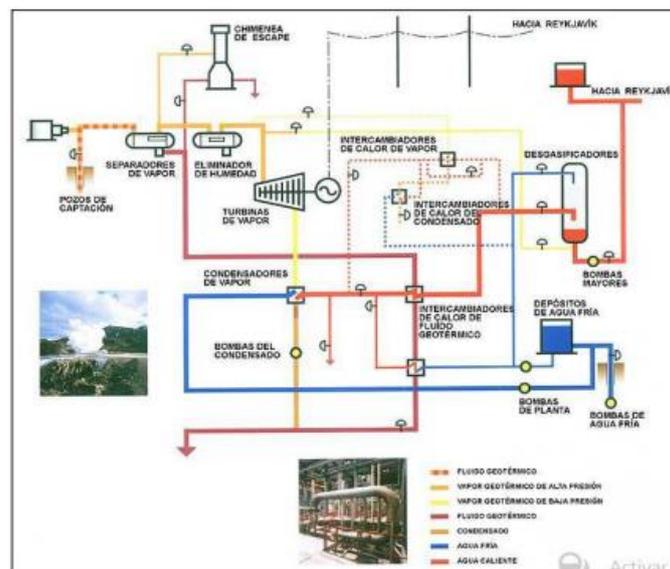
- a) Escasa o nula porosidad y permeabilidad primaria de las rocas encajonantes y de la propia roca caliente; y escasez de conductos naturales (fracturas o fallas) que podrían causar porosidad y permeabilidad secundaria.
- b) Ausencia de fluidos capaces de transferir el calor de la rica por convección

Sistemas de energía geotérmica mejorada (EGS)

Estos yacimientos se crean mediante la acción del hombre ya que la permeabilidad de las rocas y el agua pueden ser mejoradas a través de Sistemas Geotérmicos Estimulados. La permeabilidad se mejora inyectando volúmenes de agua a elevada presión por un pozo para producir su fracturamiento, se denomina a este proceso hidrofracturación, provoca que se produzca un intercambio energético mediante la circulación de un fluido inyectado desde la superficie y que retorna con un elevado aumento de temperatura (Expósito Martín, 2015).

Ilustración 8:

Esquema de la central geotérmica de Nesjavellir (Islandia)



Fuente: (Marín et al., 2018)

Historia y Evolución de la Energía Geotérmica

La energía geotérmica, una de las fuentes de energía más antiguas utilizadas por la humanidad, tiene una historia que se remonta a miles de años. Los antiguos romanos, chinos y nativos americanos ya aprovechaban las aguas termales para bañarse y cocinar. Sin embargo, el uso moderno de la energía geotérmica comenzó a principios del siglo XX, cuando se desarrollaron las primeras plantas geotérmicas para generar electricidad. En 1904, en Larderello, Italia, se construyó la primera planta geotérmica comercial del mundo, marcando un hito en la utilización de esta fuente de energía. Desde entonces, la tecnología ha avanzado significativamente, permitiendo la explotación de recursos geotérmicos a mayor profundidad y eficiencia, contribuyendo así a la diversificación de las fuentes de energía renovable y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles (DiPippo R. , 2012)

Importancia y Beneficios de la Energía Geotérmica

La energía geotérmica es una fuente renovable con importantes beneficios ambientales y económicos. Esta energía ofrece una fuente constante y sostenible, sin importar las condiciones meteorológicas, lo que la convierte en muy fiable. Adicionalmente, posee una baja huella de carbono, lo que ayuda a atenuar el cambio climático y a mejorar la calidad del aire. Su progreso también fomenta la autonomía energética y genera empleos en las zonas donde se llevan a cabo proyectos geotérmicos. (Johnston et al., 2011)

Contribución a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

La energía geotérmica libera considerablemente menos gases contaminantes y dióxido de carbono en comparación con los combustibles fósiles. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), "las instalaciones de energía geotérmica liberan menos de 50 g de CO₂ por kWh generado, mientras que las de

carbón alcanzan los 900 g por kWh" (IRENA, Geothermal power: Technology brief, 2017).

Disponibilidad constante de energía

A diferencia de otras fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, la energía geotérmica ofrece un abastecimiento ininterrumpido y constante. Esto la transforma en un recurso fiable para cubrir las demandas energéticas fundamentales de las redes eléctricas (Lund y Freeston, 2010).

Diversificación de la matriz energética

Incorporar la energía geotérmica en la matriz energética ayuda a diversificar los recursos energéticos, potenciando la capacidad del sistema para resistir variaciones externas. La geotermia es un complemento ideal para otras energías renovables, particularmente en zonas volcánicas o con elevada actividad tectónica (DiPippo R. , 2012).

Beneficios económicos

Una vez instalada la infraestructura, los gastos operativos de la energía geotérmica son reducidos. Además, crean puestos de trabajo locales tanto durante la etapa de exploración como durante el funcionamiento de las plantas. De acuerdo con el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC), las iniciativas geotérmicas pueden producir entre 5 y 10 puestos de trabajo por MW instalado, lo cual favorece a las comunidades locales (EGEC, 2022).

Impacto ambiental reducido

La repercusión ecológica de la energía geotérmica es notablemente reducida. Una investigación de Holm y colaboradores (2012) sostiene que la reinyección de fluidos

geotérmicos al reservorio no solo preserva el recurso, sino que también reduce la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas (Holm et al., 2010).

Usos directos del calor geotérmico

La energía geotérmica no solo se utiliza para generar electricidad, sino también en aplicaciones directas como calefacción, refrigeración y agricultura. Los sistemas de calefacción geotérmica son hasta un 50% más eficientes que los sistemas tradicionales a base de combustibles fósiles (Lund et al., 2011).

Seguridad energética

La estabilidad del abastecimiento de energía a través de la geotermia potencia la seguridad energética de las naciones, dado que solo se basa en recursos internos. De acuerdo con IRENA las naciones con recursos geotérmicos poseen la posibilidad de disminuir su dependencia de las importaciones de combustibles fósiles (IRENA, 2017).

Sostenibilidad a largo plazo

La energía geotérmica es renovable siempre que los reservorios se administren correctamente. La reinyección de agua geotérmica conserva la presión del reservorio, lo que facilita un manejo sostenible durante décadas (Axelsson et al., 2005).

Avances tecnológicos y su impacto en la eficiencia

Los progresos en métodos como los sistemas de energía geotérmica optimizada (EGS) facilitan el uso de reservorios de roca caliente y seca. Pruess y colaboradores (1999) indican que "las técnicas actuales de fracturación hidráulica están mejorando la eficacia de los recursos geotérmicos no tradicionales" (Pruess K. , 1991).

Principios Fundamentales del Recurso Geotérmico

Los fundamentos esenciales del recurso geotérmico se fundamentan en la utilización del calor interno del planeta. Este calor es principalmente originado por la desintegración radiactiva de elementos en el núcleo y la superficie terrestre. Se pueden categorizar los sistemas geotérmicos en hidrotermales y petrotermales. Los recursos hidrotermales contienen agua caliente y vapor en los acuíferos subterráneos, en cambio, los recursos petrotermales emplean rocas secas y calientes, que necesitan métodos como la fracturación hidráulica para obtener el calor. Este recurso se aprovecha a través de la perforación de pozos que facilitan la obtención de calor para producir electricidad o para usos directos como la calefacción. (Lund et al., 2010)

Gradiente Geotérmico

El gradiente geotérmico se refiere al incremento de la temperatura en relación con la profundidad en la corteza de la Tierra. Este gradiente suele oscilar entre los 25-30 °C por kilómetro, aunque puede ser superior en zonas con actividad tectónica o volcánica. El gradiente geotérmico es un indicador crucial que establece la factibilidad de utilizar energía en cualquier proyecto geotérmico (Hochstein M. , 1999).

Transferencia de Calor en el Subsuelo

Según (Incropera et al., 2007), “la convección es el mecanismo más eficiente en sistemas geotérmicos donde los fluidos transportan grandes cantidades de energía térmica”, La transferencia de calor en la Tierra ocurre a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación.

- **Conducción térmica**

El calor se transmite a través de las rocas debido a diferencias de temperatura.

- **Convección térmica**

Movimiento de fluidos calientes en sistemas hidrotermales.

- **Radiación térmica**

Pequeño porcentaje, principalmente desde el núcleo terrestre.

Propiedades Termodinámicas de los Fluidos Geotérmicos

El comportamiento del agua y el vapor en los sistemas geotérmicos es esencial para su utilización. La densidad, viscosidad y presión de los fluidos varían en función de la temperatura y influyen en la eficacia de la absorción térmica, el cambio en las características del líquido establece la cantidad de energía térmica que puede ser llevada a la superficie (Stone, 1980).

Clasificación de los Sistemas Geotérmicos

La entalpía define el tipo de tecnología aplicable y la viabilidad del recurso, los sistemas geotérmicos se clasifican según su entalpía (nivel de energía térmica):

- **Alta entalpía**

Temperaturas superiores a 150 °C, usadas para generar electricidad.

- **Media y baja entalpía**

Temperaturas entre 50 y 150 °C, destinadas a usos directos como calefacción.

Reservorios Geotérmicos

Los reservorios geotérmicos son formaciones subterráneas que almacenan calor y fluidos aprovechables, la naturaleza del reservorio determina la tecnología de extracción y su viabilidad económica (Dickson y Fanelli, 2005).

Se clasifican en:

- **Hidrotermales**

Contienen agua líquida o vapor.

- **Roca seca caliente (RSC)**

Calor almacenado en rocas sin presencia de fluidos.

- **Geopresurizados**

Agua a alta presión atrapada en sedimentos.

Comportamiento Del Gradiente en Función de la Litología

La litología de la zona influye en la repartición y transmisión del calor. Las rocas metamórficas y ígneas poseen una conductividad térmica elevada, en cambio, las rocas sedimentarias suelen tener una conductividad inferior. Es fundamental la conductividad térmica de la roca para calcular la transferencia de calor en reservorios geotérmicos para estimar la transferencia de calor en reservorios geotérmicos (Rubio J. , 2015).

Presión y Permeabilidad Del Reservorio

La permeabilidad del reservorio es esencial para garantizar un flujo constante de fluidos geotérmicos, la presión y permeabilidad del reservorio influyen en el movimiento de los fluidos y la eficiencia de extracción (Grant et al., Geothermal Reservoir Engineering, 2011).

- **Permeabilidad**

Capacidad de las rocas para permitir el flujo de fluidos.

- **Presión**

Regula la elevación natural del fluido hacia la superficie.

Reinyección de Fluidos Geotérmicos

Es fundamental la reinyección de fluidos en el reservorio para preservar la presión y la sostenibilidad del recurso. La reinyección alarga la durabilidad del sistema, disminuyendo el desgaste térmico y los peligros para el medio ambiente (Axelsson et al., 2005).

Factores que Afectan el Gradiente Geotérmico

El gradiente geotérmico en zonas anómalas permite alcanzar temperaturas de hasta 300 °C a profundidades menores a 2500 metros, Varios factores influyen en el gradiente geotérmico, entre ellos:

- **Actividad volcánica y tectónica**

Aumentan la temperatura a menores profundidades.

- **Conductividad térmica de las rocas**

Controla la transmisión del calor.

- **Presencia de fluidos hidrotermales**

Facilita la convección.

Balance de Energía y Conservación Del Calor

El equilibrio energético en un sistema geotérmico ilustra la manera en que el calor se reparte y se mantiene en el subsuelo. Esto se representa a través de la ecuación de conservación de energía, la cual abarca la transmisión de calor a través de la conducción y la convección. La balanza térmica entre la roca y el fluido es esencial para asegurar una eficaz extracción del recurso (Bundschuh y Suárez, 2010).

Geología y Tipos de Reservorios Geotérmicos

El conocimiento de la geología y las clases de reservorios geotérmicos es esencial para comprender el uso de la energía geotérmica. Principalmente, se categorizan los reservorios geotérmicos en tres categorías: hidrotermales, geopresurizados y de roca caliente seca. Los hidrotermales son los más comunes y se encuentran en áreas con actividad volcánica, donde el agua caliente o el vapor se almacenan en formaciones rocosas permeables. Los geopresurizados contienen agua caliente a alta presión atrapada en formaciones de roca sedimentaria. Los reservorios de roca caliente seca requieren técnicas de estimulación hidráulica para extraer el calor almacenado en rocas profundas sin agua (Dickson y Fanelli, *Geothermal energy: Utilization and technology*. Earthscan., 2005)

Reservorios de alta temperatura

Los reservorios de alta temperatura se definen como aquellos donde la temperatura del fluido geotérmico excede los 150 °C, usualmente vinculados con áreas volcánicas y tectónicamente activas. Estos reservorios resultan particularmente apropiados para producir electricidad, gracias a la elevada eficiencia térmica que se puede lograr. El calor en estos reservorios surge de la interacción de magma próximo con agua subterránea, generando vapor y agua caliente a presiones elevadas que pueden ser extraídas a través de perforaciones para su aplicación en instalaciones geotérmicas. (Hochstein M. , 1990)

Reservorios de baja temperatura

Los reservorios de baja temperatura son aquellos en los que la temperatura del fluido geotérmico es inferior a 150 °C. Estos reservorios se encuentran generalmente en áreas con menos actividad volcánica y tectónica. Aunque no son adecuados para la generación de electricidad, son ideales para aplicaciones directas como calefacción, agricultura, balneoterapia y usos industriales. La utilización de estos recursos es

especialmente valiosa en regiones donde la energía convencional es costosa o limitada, proporcionando una fuente de calor eficiente y sostenible (Lund J. , 2003)

Transferencia de Calor

La transferencia de calor que se lleva a cabo desde el ICG hacia la tierra y viceversa, es influenciada directamente por una serie de factores (Rubio O. , 2015), los cuales se describen a continuación.

Conducción térmica

La conducción térmica es un mecanismo de transferencia de calor en el que la energía térmica se mueve a través de un medio material a través de la vibración y el movimiento de moléculas y átomos, sin que estas partículas se muevan de manera efectiva (Holman, 1997).

Convección térmica

Se denomina convección térmica al proceso de transmisión de energía térmica provocado por variaciones de temperatura entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, o entre capas de un fluido en movimiento. Este fenómeno se manifiesta de dos maneras: la convección natural y la convección forzada. En el proceso de convección forzada, el fluido se desplaza a través de fuerzas externas como ventiladores o bombas. En el proceso de convección natural, el desplazamiento del líquido se origina por fluctuaciones de densidad provocadas por variaciones de temperatura. Diversos elementos, tales como la rapidez del fluido, las propiedades físicas del fluido y la forma de la superficie de transferencia de calor, influyen en la eficiencia de la transferencia de calor por convección. (Incropera F. , 2002).

Evaluación del Potencial Geotérmico

La evaluación del potencial geotérmico incluye una serie de estudios preliminares y detallados. El objetivo de estos estudios es determinar la extensión y la calidad de los recursos geotérmicos. Estos estudios incluyen la recopilación de datos sobre temperatura, conductividad térmica y flujo de calor y el uso de técnicas geofísicas y geológicas para mapear estructuras subterráneas. Además, se realiza una evaluación económica para determinar si es factible utilizar estos recursos para producir electricidad o para generar calor directamente. Para el desarrollo de proyectos geotérmicos, la evaluación es un paso crucial porque proporciona información esencial para la planificación y el diseño del proyecto (Hochstein M. , 1990).

Métodos de exploración

Los procedimientos de investigación geofísica evalúan las características físicas del subsuelo, tales como la conductividad eléctrica, la densidad, la magnetización y las características sísmicas. Algunas de estas técnicas incluyen la prospección sísmica, gravimétrica, magnética y electromagnética. En contraposición, los enfoques geológicos se centran en el análisis de la superficie de la Tierra y la representación cartográfica de las estructuras rocosas, mientras que los enfoques geoquímicos se centran en el estudio químico de rocas, suelos, gases y aguas para detectar irregularidades que sugieran la existencia de recursos. Los procedimientos combinados posibilitan una valoración más exacta y eficaz de los recursos existentes, mientras se disminuyen los riesgos y los gastos de exploración. (Kearey et al., 2002).

Técnicas de prospección

El uso de métodos no invasivos para medir las propiedades físicas del subsuelo, como la resistividad eléctrica, la densidad, el magnetismo y la velocidad de las ondas sísmicas, es parte de las técnicas de prospección geofísica. Estos procedimientos

simplifican la identificación de irregularidades que podrían señalar la presencia de reservorios de recursos naturales. Los enfoques geoquímicos se centran en la recolección y estudio de muestras de terreno, roca y agua con el objetivo de identificar señales químicas vinculadas a depósitos de minerales o hidrocarburos, en cambio, los enfoques geológicos comprenden la cartografía de la superficie terrestre y el estudio de erupciones para deducir la geología subyacente. La mezcla de estos métodos incrementa la posibilidad de éxito en la detección de recursos económicos viables al ofrecer una perspectiva completa de la subsuperficie. (Telford et al., 1990).

Diseño de Pozos Geotérmicos

La construcción de pozos geotérmicos requiere una serie de elecciones técnicas e ingenieriles para maximizar la generación de calor del reservorio geotérmico. Esto abarca la elección de la localización del pozo fundamentada en investigaciones geológicas y geofísicas, la configuración del camino del pozo para optimizar la intersección con áreas de elevada permeabilidad, y la selección de materiales de revestimiento capaces de resistir temperaturas elevadas y resistir la corrosión. También es fundamental el diseño del sistema de manejo de fluidos, que incluye el control de presión y temperatura, y la disposición de los fluidos de desecho. La correcta planificación y ejecución de estas etapas aseguran la operación segura y eficiente del sistema geotérmico, permitiendo una extracción sostenible de energía (Dickson, 2003).

Diseño de Intercambiadores de Calor en Pozos Coaxiales

Se analiza la eficiencia de varios diseños de pozos geotérmicos en un único pozo, determinando que los intercambiadores de calor de pozo coaxial mejoran la extracción de calor geotérmico y reducen las pérdidas de presión hidráulica en intercambiadores de calor enterrados de profundidad media a alta (Ardila, 2024).

Guías Técnicas para Sistemas de Intercambio Geotérmico de Circuito Cerrado

La elaboración de sistemas de circuito cerrado define métodos para calcular la capacidad de transferencia de calor del subsuelo y elegir el tamaño apropiado del sistema. Estas directrices técnicas son esenciales para asegurar la eficacia energética en proyectos de escala media y pequeña (ATECYR, 2012).

Selección del Sitio de Perforación

La selección del sitio de perforación es un proceso multifacético que requiere una comprensión profunda de las características geológicas y geofísicas del área de interés. Incorpora el estudio de información sísmica, investigaciones de magnetometría y gravimetría, así como la interpretación de registros de pozos existentes. Además, se toman en cuenta elementos como el acceso al lugar, la cercanía a infraestructuras ya existentes, las limitaciones legales y medioambientales, y la valoración de riesgos geológicos, tales como la existencia de averías activas o condiciones de presión inusuales. Incorporar estos elementos en un modelo de evaluación holística facilita a los ingenieros y geocientíficos la elección de la localización que mejore la obtención de recursos, disminuya los gastos de perforación y disminuya los efectos en el medio ambiente. (Economides y Nolte, 200).

Geología

Los objetivos de la geología en la etapa de reconocimiento serán los de proporcionar elementos geocientíficos que permitan identificar y clasificar, en orden prioritario, las áreas de interés geotérmico. La contribución de la geología en el reconocimiento se considera fundamental, en cuanto los recursos económicos y la extensión del área por investigar generalmente no permiten desarrollar estudios geofísicos. Al geólogo le tocará realizar la integración geológica de los datos geoquímicos, hidrogeológicos y geofísicos recopilados y analizados por los especialistas en esos sectores, y elaborar el esquema vulcanológico regional y geotérmico de las áreas de interés (Garnish, 1987).

Los alcances de la geología en forma general se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Elaborar la cartografía regional y definir el esquema geovulcanológico preliminar de la zona investigada.
- Definir la relación de la geodinámica regional con la tectónica y el vulcanismo de la zona.
- Determinar las anomalías termales a niveles someros de la corteza terrestre.
- Definir la secuencia estratigráfica regional y las características litológicas de las formaciones que la integran.
- Elaborar la cartografía geovulcanológica de las áreas geotérmicas identificadas.
- Describir preliminarmente el marco geovulcanológico de las anomalías o áreas geotérmicas identificadas.
- Identificar los elementos que podrían integrar los sistemas geotérmicos descubiertos (fuente de calor, yacimiento y sello) y formular sus esquemas preliminares.
- Definir, clasificar y seleccionar las áreas geotérmicas de interés.

Evaluación del recurso

Si bien la perforación de pozos geotérmicos y de hidrocarburos comparten ciertas similitudes, existen diferencias significativas en términos de condiciones de trabajo y requerimientos técnicos. Las altas temperaturas, la presencia de fluidos corrosivos y la complejidad geológica de los yacimientos geotérmicos exigen el desarrollo de tecnologías de perforación específicas y adaptadas a estas condiciones extremas.

Tipos de perforaciones

Perforación rotativa

Son las más utilizadas en la exploración y extracción geotérmica. Su funcionamiento se basa en la aplicación de una fuerza de rotación y presión sobre una herramienta cortante para fragmentar la roca. El desempeño de las perforadoras rotativas depende de varios factores, algunos tienen que ver con la máquina misma, como la fuerza que aplica, la velocidad a la que gira, el desgaste de la punta y el tamaño del agujero; otros factores dependen de lo que se está perforando, como el tipo de roca. La elección del tipo de broca (tricono o de insertos de corte) depende de las características de la formación rocosa. (Yepes, 2014)

Perforación con martillo de fondo

La perforación con martillo de fondo o perforación DTH, desarrollada por Stenuick en 1951, se basa en la percusión directa a la broca mediante un martillo en fondo, lo que maximiza la transmisión de energía y permite alcanzar mayores profundidades. La perforación DTH se caracteriza por su alta velocidad de penetración, especialmente en formaciones rocosas duras, y por su capacidad para alcanzar profundidades superiores a los 100 metros. (Yepes, 2013)

Perforaciones direccionales

El objetivo general de la perforación direccional es dirigir la barrena en la dirección deseada, para lograrlo es necesario tener control del ángulo y la dirección del pozo, los cuales son referidos al plano de inclinación y dirección respectivamente. En general los pozos direccionales pueden ser de diferentes tipos de trayectorias: Tipo Slant, Tipo S y Tipo S modificado; al seleccionar el tipo de trayectoria se debe tener en cuenta principalmente factores como las características de la estructura

geológica, espaciamiento entre pozos, profundidad vertical y el desplazamiento horizontal del objetivo. (Delgado y Juárez, 2014)

Perforación con circulación inversa

La perforación con circulación inversa es un método que invierte el sentido de circulación del fluido, permitiendo una extracción más efectiva de los detritos, lo que reduce el riesgo de atascos y permite un avance más rápido y controlado del pozo. (Gáldez, 2023)

Técnicas y desafíos

La perforación de pozos geotérmicos mediante sus técnicas presenta desafíos durante la ejecución de sus operaciones, algunos de estos desafíos revelantes es la geología, los reserforios de altas temperaturas, la selección de taladro de perforación, pérdida total de circulación, cementación, etc. (Cevallos, 2018)

Construcción y Completación del Pozo

La construcción y completación del pozo es el mas importante de todos los procesos de cementación. Realizada inmediatamente después de la instalación de la tubería de revestimiento es un proceso fundamental en la construcción de pozos geotérmicos. El método convencional de una sola etapa es el mas común y ampliamente utilizado para lograr la integridad y el aislamiento del pozo. (Delgado y Juárez, 2014)

- Se ejecuta la operación de bajada de la sarta de cementación donde incluye revestimiento, el centralizador, la zapata guía y otros componentes, con el objetivo de garantizar una correcta cementación del espacio anular.
- En la parte superior d la tubería se coloca el cabezal de cementación. La correcta colocación de los tapones de desplazamiento (limpiador y

desplazamiento) dentro del cabezal determina la eficiencia y el éxito de la operación de cementación.

- Para iniciar la cementación se debe realizar antes las pruebas de presión.
- Se fuerza la circulación del fluido de limpieza a través del pozo.
- Se introduce un tapón limpiador en el fondo del pozo para eliminar los residuos de la perforación. A continuación, se coloca un bache espaciador con el objetivo de crear una zona limpia entre el fluido de perforación y la lechada de cemento. Al alcanzar el cople flotador, el tapón limpiador se rompe, permitiendo el paso de la lechada de cemento hacia el espacio anular, donde se fragua y forma sello.

Una vez concluida la etapa de cementación, se procede a liberar el tapón desplazador, iniciándose así la circulación del fluido de desplazamiento. La operación se interrumpe cuando el fluido de desplazamiento alcanza y sobrepasa el cople flotador, posicionándose en la zona superior del tapón. (Delgado y Juárez, 2014)

Materiales de tuberías

La durabilidad y el rendimiento de un pozo geotérmico dependen en gran medida de la selección adecuada de los materiales para las tuberías. Estos materiales deben tener la habilidad de resistir las condiciones extremas del subsuelo y asegurar el funcionamiento seguro y eficaz del pozo a largo plazo. (Grant y Bixley, 2011)

- **Acero al carbono:** Aunque el acero al carbono es una alternativa asequible para los pozos geotérmicos, su capacidad para resistir la corrosión en entornos geotérmicos severos es restringida. Para vencer esta restricción, normalmente se utilizan revestimientos protectores que prolongan notablemente su durabilidad.

- **Acero Inoxidable:** Son los empleados debido a su sobresaliente resistencia a la corrosión y su capacidad para operar a altas temperaturas.
- **Aleaciones de Níquel y Cromo:** este tipo de aleaciones son resistentes a altas temperaturas y a la corrosión, estas aleaciones encuentran aplicación en entornos geotérmicos extremadamente agresivos, como reservorios de alta entalía caracterizados por la presencia de ácidos y sales corrosivas. Aleaciones como Inconel y Hastelloy superan significativamente las limitaciones de los materiales convencionales, como el acero al carbono o los aceros inoxidable, en estas condiciones extremas.
- **Tuberías de Fibra de Vidrio:** debido a su resistencia a la corrosión y su bajo peso específico, las tuberías de fibra de vidrio se han posicionado como una alternativa viable en algunas aplicaciones geotérmicas. Sin embargo, sus limitaciones térmicas restringen su uso a pozos con condiciones de temperatura relativa bajas. (Hole y Juvkam-Wold, 1992).

Diseño de la terminación del pozo

El diseño de la terminación del pozo geotérmico es un factor crítico para optimizar la producción de energía geotérmica. Una terminación apropiada facilita el acceso a los recursos geotérmicos, disminuye las pérdidas de presión y garantiza un funcionamiento seguro y confiable del pozo.

La terminación del pozo geotérmico es un paso crucial en su diseño, pues garantiza la solidez estructural, la regulación del flujo y la mejora en la obtención de calor del reservorio. El diseño final es un procedimiento esencial para asegurar que el pozo se mantenga seguro y eficaz durante toda su vida útil, particularmente en situaciones extremas de temperatura y presión (Grant y Bixley, 2011). Este procedimiento abarca la elección de materiales apropiados, la unión de revestimientos y la configuración del acceso al reservorio para optimizar la transmisión de calor y reducir las pérdidas (Okandan, 1988).

Componentes clave del diseño de terminación

Revestimientos(casing):

Las secciones de revestimiento tienen un rol crucial en la integridad y operación de un pozo geotermico, ya que brindan apoyo a las paredes del pozo, regulan las presiones y aíslan las áreas de producción.

- **Revestimiento superficial:** asegura la estabilidad de las paredes del pozo y sella las zonas poco profundas, evitando la migración de fluidos.
- **Revestimiento intermedio:** confina las zonas del pozo caracterizadas por altas presiones o inestabilidad geológica.
- **Revestimiento de producción:** se posiciona en la zona productora del pozo, facilitando el ascenso de los fluidos geotérmicos hacia la superficie.

Cementación:

El proceso de cementación es crucial en la edificación de pozos geotérmicos, pues asegura la integridad mecánica del pozo y previene pérdidas de fluido. Los cementos empleados en estas circunstancias necesitan tener características particulares que les faciliten soportar las elevadas temperaturas y los entornos corrosivos que se encuentran en los depósitos geotérmicos. (Hagen, 2008). Este proceso incluye:

- **Colocación de lechada de cemento especial**

Diseñada para resistir altas temperaturas y condiciones corrosivas.

- **Pruebas de presión antes y después de la cementación**

Aseguran la estabilidad del pozo y la ausencia de fugas.

Técnicas de Terminación del pozo

- *Terminación Abierta:*

Con el fin de maximizar el flujo de fluidos geotérmicos en determinadas casiones se decide no revestir la zona productora del pozo. Decisión que se basa en la consideración de que la formación geológica es lo suficientemente competente para como para mantener la apertura del pozo.

- *Terminación Revestida*

Se emplea un revestimiento en la sección productora del pozo, sin embargo, se perforan orificios en este revestimiento mediante la técnica de cañoneo para facilitar el flujo de los fluidos geotérmicos hacia el pozo. Esta práctica es común en formaciones geológicas menos consolidadas o cuando se requiere un control preciso del flujo en zonas específicas." (Delgado y Juárez, 2014)

Control Del flujo en la terminación

La planificación final debe asegurar un flujo constante y regulado del fluido geotérmico. Se incorporan válvulas y instrumentos de control destinados a gestionar las condiciones de presión y temperatura en el depósito. Es fundamental un control eficaz del flujo para prevenir variaciones de presión que puedan perjudicar la integridad del pozo (Baba y Chandrasekharam, 2022).

Simulación de Pozos Geotérmicos

Se emplean simuladores de pozos geotérmicos para simular la conducta del recurso geotérmico y perfeccionar el diseño y la obtención de energía.

Modelado Matemático de Pozos Geotérmicos

Es esencial simular el funcionamiento de los pozos geotérmicos, desde la circulación de fluidos hasta la transmisión de calor, para optimizar la obtención de energía. Los modelos matemáticos facilitan la comprensión y la predicción de la interacción entre las variables fundamentales del subsuelo. (Bundschuh y Suárez, 2010)

- *Ecuaciones de transferencia de calor*

Ecuación de Transferencia de calor: La extracción de energía geotérmica depende del intercambio de calor entre el fluido que circula y las rocas. Este proceso se describe matemáticamente mediante la ecuación de conservación de energía, que considera tanto la conducción como la convección del calor.

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla(\rho c_p v T) = \nabla(k \nabla T) + Q_t$$

Donde:

T es la temperatura,

c_p es el calor específico del fluido,

k es la conductividad térmica del medio

Q_T es la fuente de calor (calor geotérmico).

Ecuación de Conservación de Masa: mediante este método se puede medir la cantidad de agua y vapor que entra y sale del pozo, lo que facilita su control y garantiza su eficiencia.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho v) = Q_m$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido,

ϕ es la porosidad,

v es la velocidad del fluido

Q_m es la tasa de inyección o producción de masa.

Modelos de flujo de fluidos

Herramientas y Software de Simulación

Detallamos las diferentes herramientas más comunes en simuladores geotérmicos:

- *Simuladores geotérmicos comunes*
 - COMSOL Multihysics: Permite crear modelos matemáticos de procesos geotérmicos de alta complejidad, considerando la transferencia térmica y la dinámica de los fluidos. (Rao, 2003)
 - TOUGHT2: En el modelado de procesos térmicos y de flujo en materiales geológicas con alta porosidad y fracturación, con enfoque en aplicaciones geotérmicas. (Pruess et al., 1999)
 - GEOTHERMAL: plataforma de software que simplifica la comprensión de información geotérmica, la elaboración de modelos numéricos y la

transformación de datos geofísicos en sistemas geotérmicos. (Maldaner, 2011)

MODFLOW: es un instrumento esencial para analizar el movimiento del agua bajo la tierra, pero también puede emplearse en investigaciones de calor en la tierra.

- es un instrumento esencial para analizar el movimiento del agua bajo la tierra, pero también puede emplearse en investigaciones de calor en la tierra. (Yu, 2000)
 - PYTHON: instrumento esencial para la creación de modelos a medida y el estudio de datos. Facilita la realización de simulaciones concretas para diferentes aplicaciones. (Freeston y Lund, 2010)
 - HSC Chemistry: diseñado para aprovechar las transformaciones químicas y los estados de equilibrio que suceden en los sistemas geotérmicos.. (Pruess, 2024)
- *Ventajas y limitaciones de cada herramienta*
 - COMSOL Multiphysics
 - Ventajas: una interfaz fácil de usar que simplifica el diseño y la implementación de simulaciones complejas, fusionando varios modelos físicos en un solo ambiente.
 - Limitaciones: Su alto costo y la demanda de dispositivos informáticos robustos pueden restringir su aplicación en simulaciones de baja complejidad. (Rao, 2003)
 - TOUGH2
 - Ventajas: experto en el modelo de conservación de masa, momento y energía en medios porosos, poniendo especial atención en usos geotérmicos.

- Limitaciones: El uso de esta herramienta puede resultar complicado para usuarios novatos debido a la exigencia de un entendimiento detallado de los fundamentos de modelización. (Pruess et al., 1999)
- **GEOTHERM**
 - Ventaja: herramienta clave para entender datos geotérmicos y crear fácilmente modelos que representen estos sistemas.
 - Limitaciones: al ofrecer un conjunto de herramientas más reducido, este simulador se ve limitado para modelar sistemas de mayor complejidad o de gran escala. (Maldaner, 2011)
- **MODFLOW**
 - Ventajas: se usa mucho para realizar modelos y poder simular como se mueve el agua subterránea y sirve bien para estudios de energía geotérmica.
 - Limitaciones: su diseño, al ser de carácter general y no específico para sistemas geotérmicos, podría implicar ciertas restricciones en su implementación dentro de contextos geotérmicos particulares. (Yu, 2000)
- **PYTHON**
 - Ventajas: amplia gama de opciones para desarrollar modelos específicos y llevar a cabo análisis de datos complejas.
 - Limitaciones: exige conocimientos profundos de programación y análisis matemáticos; no está diseñado específicamente para simular sistemas geotérmicos. (Freeston y Lund, 2010)
- **HSC CHERMISTRY**
 - Ventajas: esencial para comprender la cinética y la termodinámica de las reacciones químicas ocurren de los sistemas geotérmicos.
 - Limitaciones: si bien el estudio profundiza en los procesos químicos involucrados, la simulación numérica del flujo geotérmicos, esencial para comprender la dinámica del sistema, caracterizado por el flujo a través de medios porosos. (Pruess, 2024)

Optimización de la Extracción de Energía

Estudio de temperatura y presión

Los perfiles de temperatura y presión en el reservorio establecen el volumen de calor que puede ser extraído de forma eficaz. El gradiente geotérmico, en combinación con la presión del reservorio, tiene un impacto directo en la transmisión de energía. Una evaluación minuciosa de los perfiles térmicos facilita la determinación de las profundidades ideales para la perforación, optimizando la eficacia del sistema (Zayed et al., 2023).

- *Perfiles de temperatura*

Determina la variación térmica en el subsuelo a diferentes profundidades mediante sondeos o técnicas geofísicas, a través de la representación gráfica de los datos obtenidos para calcular el gradiente geotérmico. (Albert , 1980)

- *Presión del reservorio*

A través de la medición de la presión de fondo de pozo, se caracteriza el comportamiento del yacimiento y se evalúa el impacto de las tasas de producción de energía en su dinámica. Estos datos permitirán modelar el flujo del fluido y ajustar las estrategias de extracción. (Malcom et al., 1982)

Gestión Del Flujo de Fluidos Geotérmicos

La circulación de fluidos en el pozo requiere un control meticuloso para preservar un balance entre la obtención de calor y la reinyección. Métodos como la administración de fluidos a alta presión pueden contribuir a incrementar la eficiencia en términos de eficiencia térmica. Una correcta reinyección no solo mantiene la presión del

reservorio, sino que también ayuda a conservar un gradiente térmico positivo (Baba y Chandrasekharam, 2022).

Evaluación de permeabilidad

- *Pruebas de permeabilidad*

Se realizan ensayos de inyección y producción con el fin de valorar la habilidad del subsuelo para transportar fluidos. Es fundamental la permeabilidad para asegurar una transferencia eficaz de calor hacia el pozo. (Grover et al., 1997)

- *Geología de área*

Ejecuta un estudio minucioso de la litología y las estructuras geológicas, poniendo especial énfasis en las fallas y fracturas, con el objetivo de establecer su influencia en la permeabilidad y el paso de fluidos en el reservorio. (Grover et al., 1997)

- *Modelación geotérmica*

Simulación numérica: simular el comportamiento del reservorio con modelos geotérmicos nos ayuda a diseñar pozos más eficientes y a reducir costos de producción (Dickson y Fanelli, 2003).

- *Mapas geotérmicos*

Elaboración de mapas geotérmicos que integran información sobre gradiente geotérmico y la permeabilidad de las formaciones geológicas, facilitando la evaluación y selección de áreas con alta probabilidad de éxito en la exploración (Dickson, 2003).

CAPITULO III: METODOLOGÍA

Contexto de la investigación

El uso de la energía geotérmica se ha transformado en una alternativa importante para la diversificación de la matriz energética mundial, especialmente en el escenario actual de la transición hacia fuentes de energía más ecológicas y sostenibles. La energía geotérmica se genera mediante la obtención de calor acumulado en el subsuelo de la Tierra. Este calor puede emplearse para generar electricidad o como fuente directa de calor para aplicaciones industriales como la climatización. La geotermia posee el beneficio de proporcionar una generación de energía constante y estable, en contraposición a otras formas de energía renovable como la solar o la eólica. Esto la hace una alternativa valiosa para potenciar la producción de energía en las redes eléctricas.

Tipo de investigación

Este proyecto lleva a cabo una investigación aplicada, con el objetivo de acelerar el aprendizaje para solucionar un problema particular en el área de la energía geotérmica: perfeccionar el diseño de los pozos geotérmicos para incrementar la eficiencia en la obtención de calor. El propósito de la simulación numérica es proporcionar soluciones útiles para incrementar la factibilidad y la lucratividad de los proyectos geotérmicos en el sector industrial.

Podemos considerar la investigación como cuantitativa debido al uso de modelos matemáticos y simulaciones computacionales para evaluar el comportamiento de los pozos geotérmicos. La tasa de extracción de calor, la evolución de la temperatura del fluido geotérmico y la eficiencia térmica del pozo se pueden medir y los resultados se muestran en números y gráficos, lo que permite un análisis detallado de cómo varios parámetros interactúan en la eficiencia del sistema.

También se puede considerar la investigación de tipo experimental ya que se manipulan variables de diseño (como la profundidad y litología) donde se observa cómo estos cambios afectan los resultados de la simulación. Aunque se lleva a cabo de manera virtual a través de la simulación en Python, sigue los principios de un experimento controlado, donde se cambian las condiciones del modelo para comprender cómo afectan el comportamiento del sistema.

En este estudio se propone un enfoque descriptivo, con el objetivo de describir las características del sistema geotérmico, tales como la transferencia de calor y el flujo de fluidos. Se detalla cómo estas características afectan el diseño y funcionamiento de los pozos. Esta explicación minuciosa del sistema geotérmico y sus dinámicas contribuye a formar una base firme para la simulación y el estudio de los resultados, ofreciendo un marco teórico que respalda las sugerencias prácticas.

Población y Muestra

La población se compone de potenciales pozos geotérmicos que podrían ser planificados y utilizados para la obtención de energía en una zona detenida, esto abarca pozos presentes y venideros en zonas con potencial geotérmico. Las particularidades geológicas de la población oscilan entre pozos en sistemas de alta entalpía, en los que las temperaturas del reservorio son elevadas, hasta sistemas de baja entalpía, donde las temperaturas son inferiores, pero aún se ven como factibles para la producción de energía.

Para esta investigación, la muestra se define como un conjunto representativo de pozos geotérmicos hipotéticos que fueron creados para representar una variedad de escenarios de extracción de energía. Para evaluar el impacto de estas variables en la eficiencia de la extracción de calor, esta muestra incluye pozos con diferentes profundidades y tasas de flujo. La muestra se construye a partir de datos hipotéticos pero realistas ya que la simulación es una parte importante del estudio.

Parámetros del Sistema

Para elaborar un modelo de simulación, es imprescindible reconocer los parámetros que definen el sistema geotérmico. Estos incluyen las propiedades físicas del reservorio y del pozo, además de las propiedades termodinámicas del fluido geotérmico. Para una simulación exacta, es necesario obtener datos precisos acerca de la temperatura y la presión iniciales del reservorio, dado que estas influyen directamente en el comportamiento del flujo y la transferencia de calor.

La capacidad del reservorio geotérmico para transferir calor al fluido depende de sus propiedades, como la conductividad térmica y la difusividad térmica de la roca. Un reservorio con alta conductividad térmica aumentará la tasa de extracción de energía al permitir una transferencia de calor más eficiente. Sin embargo, la difusividad térmica tiene un impacto en la rapidez con la que el calor se propaga a través de la roca hacia el pozo.

Modelado Matemático

La simulación de los procesos de extracción de energía en un pozo geotérmico se basa en el modelado matemático. La ecuación de conducción de calor, que explica cómo el calor se transmite desde la roca caliente hacia el fluido que fluye a través del pozo, es una de las ecuaciones fundamentales. Esta ecuación se representa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Dividimos el dominio en x y t

- Espacial: x_0, x_1, \dots, x_n con pasos de longitud Δx
- Temporal: t_0, t_1, \dots, t_n con pasos de longitud Δt

Discretizamos Temporalmente mediante diferencias finitas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}$$

Discretizamos espacialmente mediante Diferencias Centradas para la derivada segunda

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

Sustituimos las aproximaciones de las derivadas en la ecuación original:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

Organizamos para obtener T_i^{n+1} , que es la temperatura en el siguiente paso de tiempo:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n)$$

Dicha ecuación permite predecir la evolución de la temperatura en función del tiempo y el espacio. Para garantizar que el esquema sea estable, se debe cumplir la condición de estabilidad de Courant – Friedrichs – Lewy (CFL):

$$\frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

La ley de Darcy se utiliza para modelar el flujo de fluidos a través de la matriz rocosa hacia el pozo:

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla P$$

Derivamos

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x}$$

Sustituimos en la ecuación de Darcy

$$q = -\frac{k}{\mu} \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x}$$

Si queremos calcular la presión en un determinado tiempo tendremos:

$$\Delta P = \Delta t * q$$

$$P_i^{n+1} - P_i^n = \Delta t \left(-\frac{k}{\mu} \frac{P_{i+1}^n - P_{i-1}^n}{2\Delta x} \right)$$

$$P_i^{n+1} = P_i^n + \Delta t \left(-\frac{k}{\mu} \frac{P_{i+1}^n - P_{i-1}^n}{2\Delta x} \right)$$

La ecuación describe la proporcionalidad entre el flujo volumétrico de fluidos, la permeabilidad y el gradiente de presión. Con esta ley podemos comprender cómo el fluido geotérmico se mueve hacia el pozo y cómo se puede mantener un flujo constante durante la operación.

La eficiencia de un pozo depende de cómo interactúan el flujo de fluidos y la transferencia de calor, para ello consideramos la ecuación de balance de energía, expresada de la siguiente manera:

$$Q = \rho c_p \Delta T + \nabla q$$

$$Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q$$

Discretizamos la Ecuación de Balance de Energía utilizando el método de diferencias finitas:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q$$

Sabiendo:

- Derivada temporal

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}$$

- Derivada espacial

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

Sustituimos las derivadas en la ecuación de balance de energía:

$$\rho c_p \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} + Q_i^n$$

Despejamos T_i^{n+1}

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{k\Delta t}{\rho c_p \Delta x^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{\Delta t}{\rho c_p} Q_i^n$$

Es necesario cumplir con la condición de estabilidad de Courant Friedrichs Lewy (CFL), donde se impone un límite del paso del tiempo en función del paso espacial:

$$\frac{k\Delta t}{\rho c_p \Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

La ecuación del Balance de energía discretizada ayuda a calcular la cantidad de energía térmica que puede transportar el fluido geotérmico desde el fondo del pozo hasta la superficie. El cálculo de la cantidad de calor que se puede extraer de manera efectiva depende de este balance de energía.

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Principios Fundamentales

La energía geotérmica emerge como una de las opciones más alentadoras entre las fuentes renovables, debido a su capacidad para producir energía limpia y constante a partir del calor natural del subsuelo. Para que la disminución de emisiones y la transición hacia un sistema energético más sustentable se logre, esta energía es esencial, la geotermia tiene cualidades singulares que la sitúan como un recurso imprescindible.

Este estudio se enfoca en los fundamentos esenciales que respaldan la energía geotérmica, examinando sus facetas científicas, tecnológicas y ambientales, y subrayando su función como una fuente de energía renovable y sostenible.

Mediante el entendimiento de fenómenos fundamentales como el gradiente geotérmico, y las tecnologías de extracción, es posible analizar el potencial de la energía geotérmica. Así, se propone el uso de este recurso para favorecer la descarbonización de la matriz energética, asegurando una provisión de energía estable y respetuosa con el medio ambiente.

- **Gradiente Geotérmico**

El gradiente geotérmico o el incremento de la temperatura en función de la profundidad terrestre, es esencial para la energía geotérmica. Este fundamento se basa en que la temperatura del planeta aumenta alrededor de 25-30 °C por kilómetro. Este calor subterráneo surge de fenómenos naturales, como la desintegración radiactiva de elementos en la capa y el núcleo terrestre, además del calor residual del planeta desde su creación.

- **Reservorios Geotérmicos**

Los reservorios geotérmicos se originan en zonas con características geológicas como rocas fracturadas y sistemas de fallas, estas facilitan el flujo de fluidos a altas temperaturas. Estas zonas denominadas "sistemas hidrotermales," son particularmente frecuentes en áreas con alta actividad tectónica. Estos reservorios facilitan la acumulación de energía en lugares determinados, donde el calor puede ser utilizado de manera directa.

- **Transmisión Calor-Subsuelo**

La transferencia de calor en el subsuelo ocurre mediante la conducción y en sistemas hidrotermales mediante la convección, en la que el agua caliente se desplaza y transmite calor a través de la roca porosa. Este fenómeno facilita el desplazamiento del calor desde áreas profundas hacia la superficie, lo que se puede realizar en pozos geotérmicos.

- **Tipos de Energía Geotérmica**

La energía geotérmica puede categorizarse en entalpía alta, media y baja, en función de la temperatura del recurso utilizado. La entalpía alta, usualmente por encima de 150 °C, se emplea en la producción eléctrica, mientras que la entalpía media y baja se emplea en usos directos, como la calefacción, la refrigeración y el uso agrícola. Esta adaptabilidad permite que la geotermia sea útil en diversos sectores.

Fuente Renovable

A diferencia de los combustibles fósiles, la energía geotérmica es un recurso renovable, debido a que el calor de la Tierra se produce de forma constante. Si se gestionan adecuadamente, los reservorios tienen la capacidad de generar energía de manera constante durante décadas. Se consigue esto al revolver los fluidos

geotérmicos al reservorio, previniendo de esta manera su agotamiento y estimulando la recarga natural del recurso.

Eficiencia y Balance energético

La energía geotérmica es eficiente en su proceso de transferencia, en particular en la utilización directa de calor. A pesar de que generalmente la eficiencia en la transferencia de energía a partir de fuentes geotérmicas es inferior (cerca del 10-20% en relación a otras fuentes), el uso directo del calor en sistemas de calefacción y procesos industriales es significativamente superior, con menos pérdidas energéticas.

Impacto Ambiente Bajo

En comparación con los combustibles fósiles, los sistemas geotérmicos producen escasas emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero. Además, su impacto en la superficie es mínimo, dado que necesitan menos infraestructura superficial, lo que contribuye a reducir los impactos en el suelo y el agua. Adicionalmente, la reinyección de fluidos disminuye el peligro de contaminación y preserva el recurso.

Tecnologías

Es fundamental la perforación y el desarrollo de pozos para tener acceso a los reservorios. Hay diversas tecnologías de producción geotérmica, tales como las plantas de vapor seco y los sistemas de ciclo binario, que facilitan el uso de recursos de alta y baja entalpía. Estos sistemas se encuentran en permanente actualización, con el objetivo de optimizar la eficiencia y el uso de recursos en diversas profundidades y temperaturas.

Potencial y aplicación

A pesar de que la energía geotérmica es particularmente prevalente en áreas de intensa actividad tectónica, la tecnología de bomba de calor geotérmica facilita el uso

de recursos de baja entalpía en prácticamente cualquier zona. Esto posibilita que la geotermia aporte de manera significativa al abastecimiento de energía mundial, mediante usos tanto a escala local como en grandes instalaciones de producción.

Sostenibilidad

La energía geotérmica sobresale como una alternativa factible y sustentable en el intento de descarbonizar el sector energético. Su habilidad para suministrar energía base limpia y estable, unida a su capacidad para ser empleada en múltiples usos, la hace una opción completa para enriquecer otras fuentes renovables, como la solar y la eólica, y contribuir a disminuir la dependencia de recursos no renovables.

Simulación

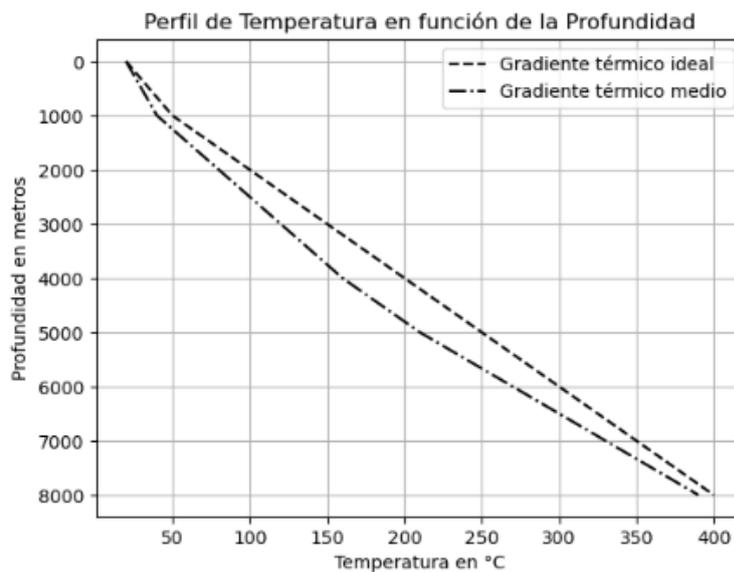


Figura 1: Perfil de Temperatura en función a la Profundidad

Los resultados de la simulación indican que la temperatura se incrementa con la profundidad, lo que concuerda con el gradiente geotérmico. Este aumento de la temperatura es crucial para el rendimiento del pozo geotérmico, dado que la eficacia en la obtención de calor se basa en lograr niveles de calor ideales a determinada profundidad. En la simulación, la

temperatura llega a niveles apropiados para la producción de energía en las secciones más profundas del pozo.

La tasa de flujo de los fluidos en el pozo es un elemento crucial en la producción de energía. La simulación facilita la observación de cómo el fluido (agua) fluctúa dependiendo de las condiciones de presión y temperatura en diversas profundidades. Se consiguió un flujo constante y apropiado en las áreas del pozo donde la temperatura son ideales, lo que indica que el modelo es efectivo en conservar un flujo de extracción constante.

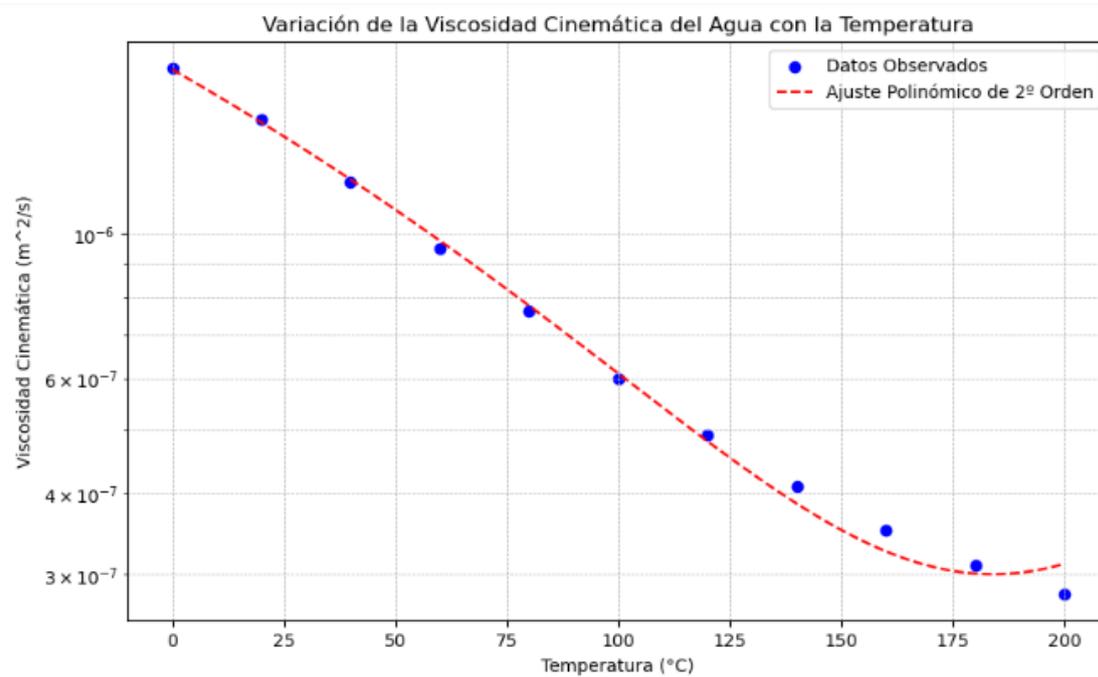


Figura 2: Variación de la Viscosidad Cinemática del agua en función de la temperatura

En la Figura 2 podemos observar la variación que tiene la Viscosidad Cinemática del agua en función del cambio de temperatura, en dicha simulación se considera el gradiente de temperatura que se daría en un pozo en función de la profundidad.

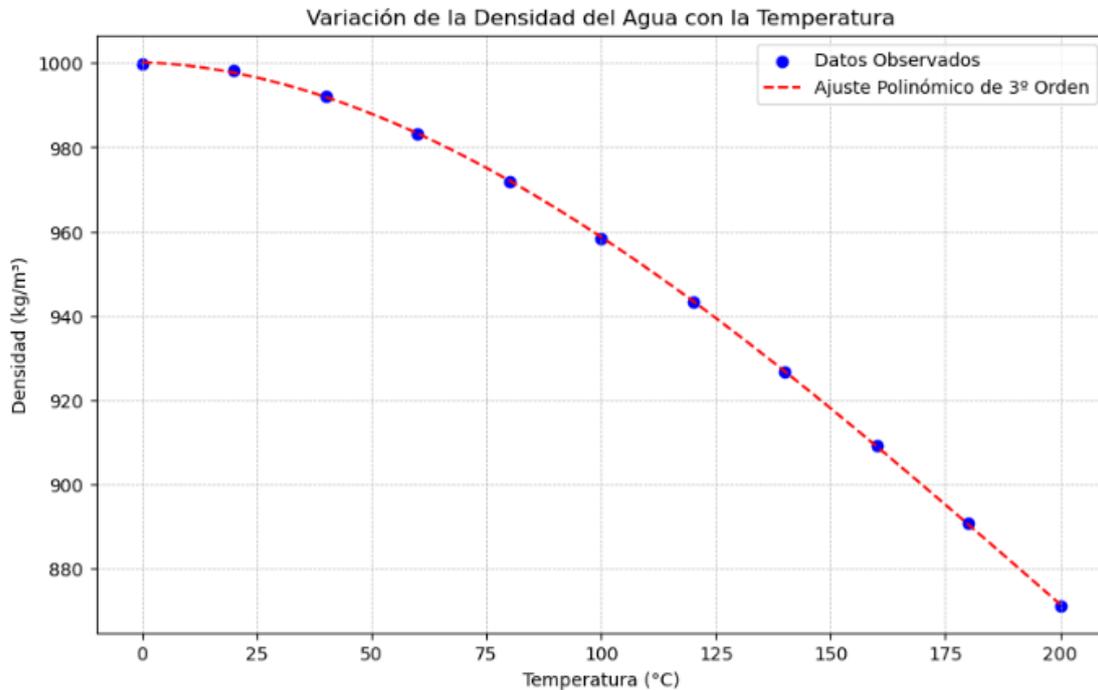


Figura 3: Variación de la Densidad del agua en función de la Temperatura

Conforme la temperatura del agua se incrementa, su densidad se reduce. Esto es resultado de la expansión térmica del agua: cuando se calienta, sus moléculas experimentan una separación más amplia, lo que conduce a una densidad reducida. En un pozo geotérmico, a mayor profundidad, las elevadas temperaturas disminuirían la densidad del fluido en esa región.

Dado que la temperatura reduce la densidad del agua, este cambio afecta el flujo ascendente de agua caliente desde las áreas más profundas del pozo hacia la superficie. A menor densidad, la presión hidrostática producida por el fluido disminuye, lo que podría ser beneficioso en lo que respecta a permitir el movimiento del agua caliente hacia la superficie, siempre que se conserve un equilibrio de presión apropiado para prevenir pérdidas de calor o inestabilidades en el sistema.

El cambio en la densidad también tiene un impacto en el diseño de los intercambiadores de calor empleados en pozos geotérmicos. El agua menos densa necesita diseños particulares que posibiliten un intercambio eficaz de calor sin pérdida de presión o energía térmica en el trayecto hacia la superficie.

El ajuste polinómico de tercer orden ofrece una aproximación valiosa para anticipar el comportamiento de la densidad del agua en diferentes condiciones de temperatura. En términos prácticos, este ajuste asiste a los ingenieros en la creación de sistemas que optimicen la eficiencia de transferencia de calor, modificando los parámetros del pozo acorde a las fluctuaciones de densidad anticipadas en base a las temperaturas obtenidas a distintas profundidades.

Entender la variación de la densidad en relación a la temperatura posibilita anticipar el comportamiento del flujo y maximizar la eficiencia energética, incrementando la extracción de energía del pozo y asegurando su funcionamiento seguro y sostenible.

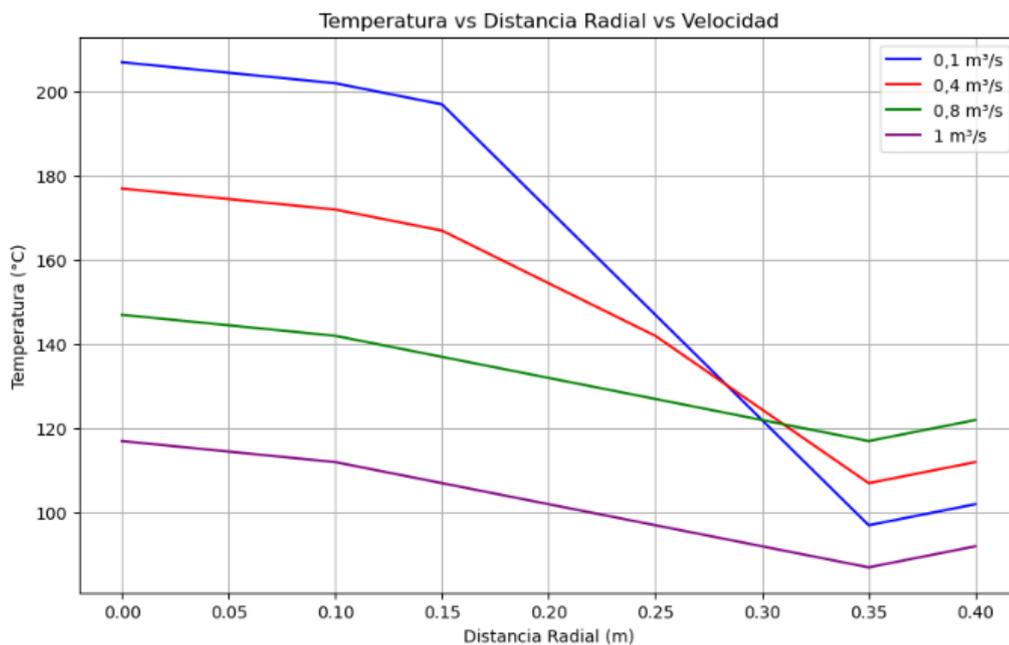


Figura 4: Temperatura en función a la Distancia Radial para velocidades diferentes

La Figura 4 muestra que a medida que se incrementa la distancia radial la temperatura disminuye, esto se da ya que el calor se disipa a medida que se aleja del centro del pozo o del área de mayor actividad térmica. La curva muestra una disminución brusca cerca de los 0.3 metros de distancia radial, lo cual podría señalar una región de transición térmica. En un pozo geotérmico, este sector podría estar ubicado en una zona donde el fluido geotérmico pierde contacto directo con las rocas más calientes o atraviesa áreas con diferentes características de conductividad térmica.

Las velocidades de flujo implican un equilibrio entre conservar una elevada temperatura del fluido geotérmico y garantizar la extracción de la mayor cantidad de calor. Las velocidades de flujo más bajas (0.1 m/s) podrían resultar beneficiosas en operaciones que intentan extraer calor más próximo al pozo, mientras que las velocidades más elevadas (1 m/s) resultarían eficaces en sistemas de transferencia de calor que requieren refrigerar rápidamente el fluido para su reutilización.

Los operadores de pozos geotérmicos tienen la capacidad de modificar las velocidades de flujo en función de las demandas de temperatura en diversas partes del pozo, lo que facilita la gestión del perfil térmico y mejora la eficiencia en la obtención de energía.

Como las temperaturas más elevadas se producen con velocidades de flujo reducidas y distancias radiales más cortas, sería crucial seleccionar materiales capaces de resistir estas condiciones térmicas para la longevidad de la infraestructura del pozo.

El balance de energía podría indicar que el incremento de velocidad ya no incrementa de manera significativa la cantidad de energía producida, debido al rápido enfriamiento del fluido. Esto permitiría determinar los puntos de operación ideales para optimizar la eficiencia.

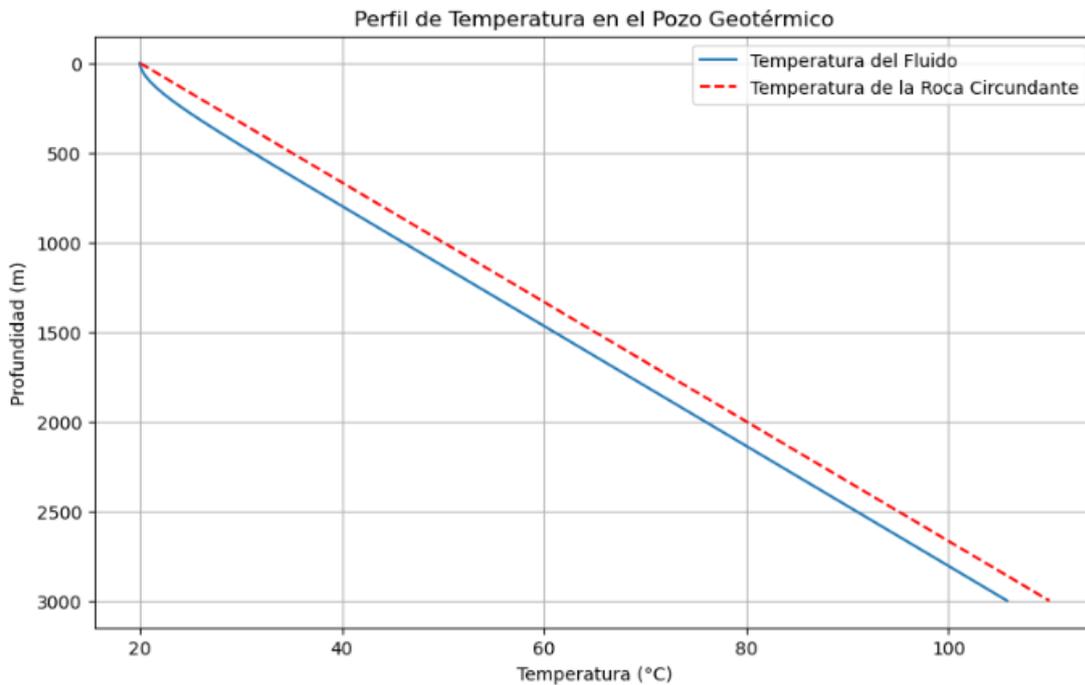


Figura 5: Perfil de Temperatura en el Pozo Geotérmico

En la Figura 5 se puede observar que la temperatura del fluido como la temperatura de la roca aumentan linealmente con la profundidad. Este gradiente es resultado de la acumulación de calor de la Tierra desde el núcleo y la capa superior hacia la corteza. En la superficie (0 metros), la temperatura de ambas fases se aproxima a los 20 °C, lo que se asemeja alrededor de la temperatura ambiente inicial. Conforme el pozo aumenta la profundidad, la temperatura llega aproximadamente a 100 °C a los 3000 metros.

La temperatura del fluido tiene la curva que se encuentra prácticamente en paralelo con la línea de la roca alrededor, lo que señala que el fluido se encuentra en equilibrio térmico o próximo a este con la roca.

La temperatura de la roca alrededor es ligeramente superior a la del fluido en todas las profundidades. Esto podría ser resultado de la transferencia constante de calor desde las rocas calientes hacia el líquido, que absorbe la energía térmica al desplazarse por el pozo.

La variación ligera y constante entre ambas curvas señala un equilibrio térmico estable en el sistema. En un diseño de pozo geotérmico, es preferible esta proximidad entre las temperaturas para optimizar la transferencia de calor al fluido sin provocar una considerable pérdida de calor hacia el ambiente.

Como el fluido y la roca permanecen prácticamente a la misma temperatura, resulta crucial elegir materiales que soporten temperaturas gradualmente elevadas conforme se incrementa la profundidad. Además, un adecuado aislamiento facilitará la disminución de las pérdidas térmicas hacia el ambiente en áreas menos profundas.

La proximidad entre ambas temperaturas sugiere que un flujo de fluido moderado puede preservar la eficiencia en la transferencia de calor. No obstante, si se busca incrementar la temperatura del líquido a niveles más bajos, aumentar la velocidad de flujo podría ser una alternativa para disminuir el tiempo de refrigeración.

Es crucial supervisar de manera constante la temperatura del fluido y de la roca alrededor. Esto facilitará la detección de si hay una pérdida de calor o si la temperatura del líquido disminuye por debajo del rango previsto, lo que podría señalar dificultades en la transferencia de calor.

También podríamos modificar la velocidad del flujo según la profundidad para optimizar la obtención de energía sin sacrificar la eficiencia térmica. En áreas profundas, un flujo más pausado podría garantizar que el fluido absorba suficiente calor antes de elevarse.

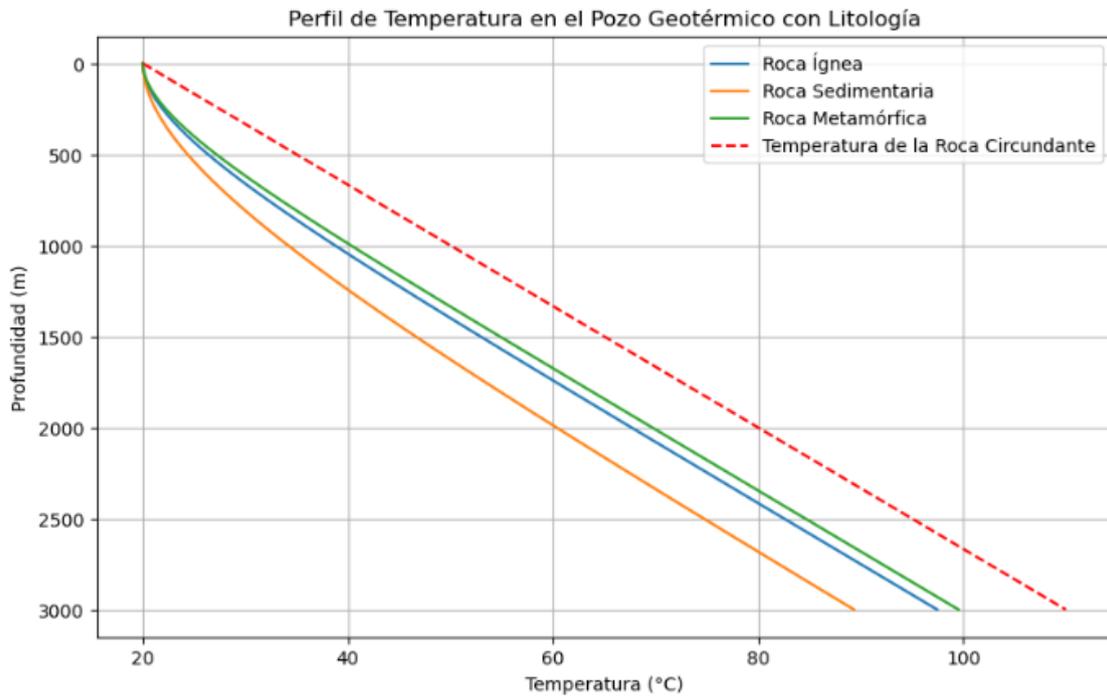


Figura 6: Perfil de Temperatura en el Pozo Geotérmico con Litología

La litología, o el tipo de roca, juega un papel esencial en cómo se distribuye el calor en el pozo. A continuación, se da explicación como cada litología influye en el intercambio de calor:

- Roca Ígnea (línea azul)

Presenta un incremento gradual de la temperatura. Las rocas ígneas, obtenidas mediante el enfriamiento y solidificación del magma, suelen poseer una excelente capacidad para conducir térmica. Esto implica que, en pozos geotérmicos, la existencia de roca ígnea puede resultar beneficiosa, dado que facilita el desplazamiento del calor desde las profundidades hacia la superficie con mayor rapidez. Las zonas con un alto contenido de roca ígnea suelen resultar interesante para los proyectos geotérmicos gracias a este eficiente flujo de calor.

- Roca Sedimentaria (Línea Naranja)

Se nota un aumento de la temperatura más pausado en comparación con las rocas metamórficas e ígneas. Las rocas sedimentarias son más porosas y suelen albergar más agua en sus cavidades, lo que impacta su habilidad para conducir calor. Esto las transforma en un tipo de "aislante" natural, donde el calor no se propaga de manera equitativa. Desde el punto de vista geotérmico, un pozo en este tipo de roca demandaría una perforación más profunda para llegar a temperaturas apropiadas para la obtención de energía, lo que podría conllevar a incrementos en los costos y retos.

- Roca Metamórfica (Línea Verde)

La roca metamórfica muestra un gradiente de temperatura bastante elevado, similar al de la roca ígnea. Este tipo de roca ha surgido bajo presiones y temperaturas extremas, proporcionándole una estructura sólida y una mayor capacidad para conducir calor. Por lo tanto, en áreas con roca metamórfica, el calor suele ser más accesible y puede representar una excelente alternativa para proyectos de energía geotérmica.

La línea roja punteada representa la temperatura de la roca circundante, o el ambiente global donde se ubica el pozo. Esta línea actúa como una media entre las otras. Esta Roca alrededor suele ser una combinación de diversos tipos de materiales y proporciona una perspectiva más amplia de la temperatura que se podría anticipar en una zona más extensa, sin estar restringida a un único tipo de litología.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La simulación numérica facilita el análisis exacto de cómo factores esenciales como la temperatura, la presión y la permeabilidad influyen en el desempeño de los pozos geotérmicos. En esta investigación, se ha demostrado que las simulaciones son un instrumento eficaz para prever el comportamiento del sistema y realizar modificaciones antes de la perforación, lo que disminuye los riesgos y optimiza el gasto operativo. Además, estas simulaciones aportan a un entendimiento más detallado de las relaciones entre el fluido y el pozo, simplificando la toma de decisiones durante la etapa de diseño.
- Los resultados indican que el control de la presión y temperatura en el pozo es crucial para garantizar un funcionamiento constante y estable en la obtención de energía. Una presión apropiada facilita un flujo ascendente continuo del fluido geotérmico, mientras que la gestión de la temperatura asegura que el fluido alcance la superficie con la suficiente energía térmica.
- La eficacia en la obtención de energía depende del gradiente geotérmico del área de perforación, que establece la tasa de incremento de la temperatura a medida que aumenta la profundidad. Este diseño estructural debe considerar tanto las particularidades del terreno como la factibilidad económica del proyecto para alcanzar un balance entre los costos y la generación de energía.
- La permeabilidad del reservorio geotérmico tiene un impacto directo en la eficacia de la extracción de calor, dado que promueve o restringe el paso de fluidos hacia el pozo. Los materiales utilizados en la edificación del pozo también tienen un papel crucial, dado que deben garantizar un flujo ideal sin poner en riesgo la solidez estructural.
- La configuración geométrica del pozo, incluyendo su profundidad y diámetro, es un factor para la optimización de la extracción de energía. Los resultados indican que

una mayor profundidad permite alcanzar zonas de alta temperatura, incrementando el flujo de calor disponible. A su vez, el diámetro del pozo debe ser el adecuado para facilitar el flujo de fluido, evitando pérdidas por fricción.

- Los modelos de simulación avanzada posibilitan anticipar una extensa gama de situaciones operativas, optimizando la exactitud en el diseño y la organización del pozo geotérmico. Estos modelos anticipan la conducta de los fluidos en el subsuelo y su reacción bajo diversas circunstancias operativas, contribuyendo a reducir riesgos y mejorar la obtención de energía.
- Las estrategias de seguimiento en tiempo real han probado ser efectivas para regular el flujo y la temperatura en el pozo, posibilitando un ajuste instantáneo de las condiciones de operación. Esto contribuye a conservar un desempeño ideal y a evitar inconvenientes que podrían perjudicar la integridad del sistema, como el sobrecalentamiento o la disminución de la presión. Además, el seguimiento en tiempo real simplifica la recolección de información para optimizar la toma de decisiones en el ámbito operativo y modificar tácticas para aumentar la producción y reducir riesgos.

RECOMENDACIONES

- Implementar sistemas de seguimiento en tiempo real en los pozos geotérmicos para identificar rápidamente variaciones en la presión, temperatura y caudal de fluidos. Este seguimiento posibilita hacer modificaciones adecuadas que incrementen la eficiencia y eviten inconvenientes operativos.
- La planificación del pozo debe tener en cuenta la profundidad y el diámetro apropiados que optimicen la transferencia de calor y reduzcan las pérdidas energéticas. Un pozo con una correcta geometría mejora el paso de los fluidos y la obtención de energía, reduciendo así el deterioro del sistema.
- Llevar revisiones regulares de la permeabilidad del reservorio, pues esta define la capacidad de transferencia de calor y desplazamiento de fluidos. Si la permeabilidad es insuficiente, se deben tomar en cuenta métodos de estimulación, como la fracturación hidráulica, para incrementar la conductividad térmica.
- Emplear materiales de revestimiento resistentes a la corrosión y capaces de soportar altas temperaturas para prolongar la vida útil del pozo y mantener la integridad estructural.
- Implementar modelos de simulación avanzada desde la etapa de planificación para prever y minimizar posibles dificultades durante la extracción. Las cifras producidas por estas simulaciones facilitan la modificación del diseño de los pozos basándose en las propiedades geológicas de la zona, mejorando la obtención de energía y disminuyendo los gastos operacionales.

Bibliografía

- Albert , S. (1980). *Geothermal energy*. An. Overview.
- Ardila, O. (2024). *Nuevo estudio evalúa el rendimiento de diferentes diseños de pozos geotérmicos* .
- ATECYR. (2012). *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*.
- Axelsson, G., Stefansson, V., Bjornsson, G., & Liu, J. (2005). *Sustainable Management of Geothermal Resources and Utilization for 100 - 300 years*.
- Baba, A., & Chandrasekharam, D. (2022). *Geothermal resources for sustainable development: A case study*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7778>
- Bundschuh, J., & Suárez, M. (2010). *Introduction to the numerical modeling of groundwater and geothermal systems*. CRC Press.
- Bundschuh, J., & Suárez, M. (2010). *Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems*. London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b10499>
- Cañizares, C., & Jácome , S. (2018). *Estudio de propectiva de la geotermia y su influencia en la matriz eléctrica en Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19625/1/CD-9028.pdf>
- Cevallos, S. (2018). *Desafíos de la perforación de pozos geotérmicos en la cordillera occidental de los Andes Ecuatorianos*. Escuela Politécnica Nacional.
- Delgado, D., & Juárez, R. (2014). *Procesos de perforación y terminación de pozos geotérmicos*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Dickson, M. (2003). *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. United Kingdom.
<https://doi.org/10.5860/CHOICE.41-1559>
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*.
 Unesco.
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2005). *Geothermal Energy: Utilization and Technology*.
 Earthscan in the UK and USA in 2005.
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2005). *Geothermal energy: Utilization and technology*.
 Earthscan. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781849772739>.
- DiPippo, R. (2012). *Environmental Impact of Geothermal Power Plants*.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-098206-9.00023-3>
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and
 Environmental Impact*. Elsevier.
<https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:2670000000172215>
- Economides, M., & Nolte, K. (200). *Reservoir Stimulation*. United States.
<https://doi.org/10.1002/9780470698821>.
- EGEC. (2022). *Geothermal Market Report 2021*. <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2021/>
- Expósito Martín, M. (2015). *Análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en
 terrenos volcánicos. Aplicaciones a la construcción en Tenerife*. Alicante .
- Freeston , D., & Lund, J. (2010). Revista Geothermal energy: The potencial of geothermal
 resources.
- Gáldez, H. (2023). *Perforación circulación inversa*. Sondeos Tejedores.

- Garnish, J. (1987). *Introduction to the EEC-US workshop on hot dry rocks*.
- Grant, M., & Bixley, P. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering*. ELSEVIER.
- Grant, M., & Bixley, P. (2011). *Ingeniería de yacimientos geotérmicos*.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780123838803/geothermal-reservoir-engineering>
- Grant, M., Bixley, P., & Donaldson, I. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering*.
- Grover, M., Lewis, J., Oberste-Lehn, D., Rawson, G., & Srinivasa, D. (1997). *Geothermal energy*.
- Gurbuz, G., Amjad, A., & Marit, B. (2023). *Global Geothermal Market and Technology Assessment*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
<https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>
- Hagen, H. (2008). *Geothermal well design-Casign and Wellhead*. Petroleum Engineering Summer Acholl.
- Hochstein, M. (1990). *Methods of Assessing the Geothermal Potential*. New Zealand.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037284-1.50010-7>
- Hochstein, M. (1990). *Classification and assessment of geothermal resources*. In *World Geothermal Congress (pp. 31-36)*. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1990/0315.pdf>.
- Hochstein, M. (1999). *Geothermal systems along the East-African Rift*. Universiti de Neuchatel . https://www.researchgate.net/profile/Manfred-Hochstein/publication/260322082_Geothermal_systems_along_the_East-

African_Rift/links/546571040cf25b85d17d29cd/Geothermal-systems-along-the-East-African-Rift.pdf

Hole, H., & Juvkam-Wold, H. (1992). *Materials selection for geothermal drilling*. Journal of Petroleum Technology.

Holm, A., Blodgett, L., Jennejohn, D., & Gawell, K. (2010). *Geothermal Energy: International Market Update*.
https://www.academia.edu/4275557/Geothermal_Energy_International_Market_Update_Geothermal_Energy_Association?auto=download

Holman, J. (1997). *Tranferencia de Calor*.

Incropera, F. (2002). *Fundamentos de transferencia de calor*.

Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
https://www.researchgate.net/publication/260081006_Fundamentals_of_Heat_and_Mass_Transfer

IRENA. (2017). *Geothermal power: Technology brief*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2017/Aug/Geothermal-power-Technology-brief>

IRENA. (2017). *Geothermal power: Technology brief*.
<https://www.irena.org/Publications/2017/Aug/Geothermal-power-Technology-brief>

IRENA. (2020). *Energy Transformation 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_Summary_2020.pdf?la=en&hash=1F18E445B56228AF8C4893CAEF147ED0163A0E47

- Johnston, I., Narsilio, G., & Colls, S. (2011). *Emerging geothermal energy technologies*. *KSCE Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12205-011-1513-y>.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. United Kingdom. <https://doi.org/10.1002/9780470864325>
- Lund, J. (2003). *Direct utilization of geothermal energy*. *UNESCO, Renewable Energy*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000131734>.
- Lund, J., & Freeston, D. (2010). *Direct utilization of geothermal energy*. Oregon. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en3081443>
- Lund, J., Freeston, D., & Boyd, T. (2010). *Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review*. *Geothermics*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.03.002>.
- Lund, J., Freeston, D., & Boyd, T. (2011). *Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004>
- Malcom, A., Iam, G., & Bixlet, P. (1982). *Geothermal reservoir engineering*. Academic Press.
- Maldaner, J. (2011). *Geothermal reservoir engineering*. Académic pres.
- Marín, B., Florez, E., Guisao, É., Macías, H., Pérez, L., Hincapié, M., & Bolívar, R. (2018). *Nitrous oxide as working fluid in enhanced geothermal systems (EGS)*. Medellín, Colombia. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=215502>
- Okandan, E. (1988). *Geothermal Reservoir Engineering*.

- Pantója, J., & Gómez, J. (2004). *Los sistemas hidrotermales*.
<https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/download/11953/11275>
- Pruess. (2024). *Modeling of geothermal system*.
- Pruess, K. (1991). *A general - purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2172/5212064>
- Pruess, K., Oldenburg, C., & Moridis, G. (1999). *Tough2 user's guide, versión 2*.
- Quijano, L. (2011). *Geotermia* (Vol. 24). Mexico.
<https://publications.mygeoenergynow.org/journals/Geotermia-Vol24-1.pdf#page=61>
- Rao, A. (2003). Nova science publishers, geothermal energy and technology.
- Rodríguez Delgado, M., & Siccha Ruiz, O. (2022). Teledetección hiperespectral y exploración geológica para la configuración de modelos geometalúrgicos en sistemas hidrotermales. *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*.
https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3669
- Rodriguez Vargas, E., & Matinez Lizarazo, A. (2023). Análisis Técnico y Financiero para Fomentar la Promoción e Inversión en Proyectos de Energía Geotérmica en Colombia.
- Rubio, J. (2015). *Conductividad térmica y gradiente geotérmico en sistemas hidrotermales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/17439/7/Tesis.pdf>
- Rubio, O. (2015). *Rendimiento en la transferencia de calor en un intercambiador de calor geotérmico utilizando una geometría híbrida*.

- Santoyo, E., & Barragán, R. (2010). *Energía Geotérmica*.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- Santoyo, É., & Barragán-Reyes, R. (2010). *Energía Geotérmica*.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- Stone, A. (1980). *Geothermal Energy - an over view*.
<https://secwww.jhuapl.edu/techdigest/content/techdigest/pdf/V01-N02/01-02-Stone.pdf>
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>
- Yepes , V. (2014). *Perforación rotativa de rocas*. Universidad Politécnica de Valencia .
- Yépes, V. (2013). *Perforación con martillo de fondo*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Yu, D. (2000). *They use of MODLFOW for geothermal modeling*. Revista Geothermal resources council transections.
- Zayed, M., Shboul, B., Yin, H., Zhao, J., & Zayed, A. (2023). *Recent advances in geothermal energy reservoirs modeling: Challenges and potential of thermofluid integrates models for reservoir heat extraction and geothermal energy piles design*. journal of energy storage. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106835>