

**Análisis Técnico y Financiero para Fomentar la
Promoción e Inversión en Proyectos de Energía Geotérmica en
Colombia**

Estefania Rodriguez Vargas y Anderson Yashar Martinez Lizarazo

Universidad EAN

Proyecto de Grado

Bogotá, Colombia

2023

**Análisis Técnico y Financiero para Fomentar la
Promoción e Inversión en Proyectos de Energía Geotérmica en
Colombia**

**Estefania Rodriguez Vargas
Anderson Yashar Martinez Lizarazo**

Proyecto de grado presentada como requisito para optar al título de:
Pregrado en Ingeniería de Energías

Docente:
Juan Diego Granada Suarez

Línea de investigación:
Energía y Procesos

Universidad EAN
Pregrado en Ingeniería
Bogotá, Colombia
2023

Resumen

El proyecto de grado presentado tiene como objetivo analizar técnica y financieramente la promoción e inversión en proyectos de energía geotérmica en Colombia. El proyecto comienza con una introducción a la energía geotérmica y su importancia en Colombia. Se discuten las ventajas y desventajas de la energía geotérmica en comparación con otras fuentes de energía renovable, así como su potencial en Colombia. También se presenta una revisión de la literatura existente sobre la energía geotérmica en Colombia y en otros países.

A continuación, se presenta una evaluación del impacto ambiental del proyecto de energía geotérmica. Se discuten los posibles impactos en la calidad del aire, el agua y el suelo, así como en la biodiversidad y los ecosistemas locales. Se presentan medidas de mitigación y prevención para minimizar estos impactos.

El documento también incluye una estimación de los costos de construcción y la rentabilidad del proyecto de energía geotérmica. Se discuten los costos de perforación, construcción de la planta y mantenimiento, así como los ingresos esperados por la venta de energía. Se presenta un análisis financiero detallado, incluyendo una evaluación de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN).

Además, se discuten las barreras y recomendaciones para fomentar la inversión en proyectos de energía geotérmica en Colombia. Se presentan las barreras técnicas, financieras, regulatorias y sociales que pueden impedir el desarrollo de proyectos de energía geotérmica en el país. Se proponen recomendaciones para superar estas barreras, incluyendo incentivos fiscales, políticas públicas y programas de capacitación.

En resumen, el proyecto busca proporcionar información valiosa para aquellos interesados en invertir en proyectos de energía geotérmica en Colombia. El documento presenta una evaluación

detallada del impacto ambiental, los costos y la rentabilidad del proyecto, así como las barreras y recomendaciones para fomentar la inversión en energía geotérmica en el país.

Contenido

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	7
1.1. INTRODUCCIÓN	8
1.2. OBJETIVOS	9
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	9
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	9
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
1.4. JUSTIFICACIÓN	11
2. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	13
3. MARCO DE REFERENCIA	16
3.1. ENERGÍAS CONVENCIONALES	16
3.2. ¿QUÉ ES LA ENERGÍA GEOTÉRMICA?	17
3.2.1. <i>¿Por qué se considera una fuente de energía renovable?</i>	18
3.3. SISTEMAS GEOTÉRMICOS	18
3.3.1. <i>Sistema geotérmico hidrotermal</i>	18
3.3.2. <i>Sistemas geotérmicos mejorados</i>	18
3.3.3. <i>Sistemas geotérmicos con yacimientos geo presurizados</i>	19
3.3.4. <i>Sistemas geotérmicos asociados a cuencas sedimentarias</i>	20
3.3.5. <i>Sistemas geotérmicos radiogénicos</i>	20
3.3.6. <i>Sistemas geotérmicos marinos</i>	21
3.3.7. <i>Sistemas geotérmicos supercríticos</i>	21
3.3.8. <i>Sistemas geotérmicos de agua caliente asociados a yacimientos de petróleo y gas</i>	21
3.3.9. <i>Sistemas geotérmicos magmáticos</i>	22
3.4. GENERALIDADES DE LA CLASIFICACIÓN Y USOS DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS	22
3.4.1. <i>Reservorios de alta entalpia</i>	22

3.4.2.	<i>Reservorios de mediana entalpia</i>	23
3.4.3.	<i>Reservorios de baja entalpia</i>	24
3.5.	USOS DEL RECURSO GEOTÉRMICO DE ACUERDO CON SU TEMPERATURA	24
3.6.	TIPOS DE CENTRALES DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA	24
3.6.1.	<i>Plantas geotérmicas de vapor directo</i>	25
3.6.2.	<i>Plantas geotermoeléctricas de chorro de vapor</i>	26
3.6.3.	<i>Plantas geotermoeléctricas binarias</i>	27
3.7.	SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO	29
3.8.	POTENCIAL GEOTÉRMICO EN COLOMBIA	30
3.9.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE CENTRALES GEOTÉRMICAS	31
3.10.	MARCO REGULATORIO PARA PLANTAS GEOTÉRMICAS EN COLOMBIA	31
3.10.1.	FASES DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO Y SU REGULACIÓN	33
1.	<i>Actividades de reconocimiento y prospección</i>	33
2.	<i>Etapa de exploración</i>	35
3.	<i>Etapa de explotación</i>	37
	<i>Cumplimiento de Normas de Abandono de Pozos</i>	38
4.	ANÁLISIS DE RESTRICCIONES	39
4.1.	<i>Restricciones ambientales</i>	39
4.2.	<i>Restricciones económicas</i>	40
4.3.	<i>Restricciones legales</i>	41
4.4.	<i>Restricciones socioculturales</i>	42
5.	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	43
5.1.	COSTO DE GENERACIÓN.....	43
5.2.	ANÁLISIS ECONÓMICO	45
5.2.1.	<i>Consideraciones Técnicas</i>	45
6.	SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM)	47
7.	RESUMEN	49

1. Introducción, Objetivos y Definición del Problema

La energía geotérmica se basa en el uso del calor interno de la tierra, siendo catalogada como una energía renovable, constante e inagotable [1]. Dependen de características geológicas para validar si viable la explotación del recurso y la clasificación que se le pueda asignar al aprovechamiento de la energía. Los fenómenos geológicos donde se presenta actividad sísmica y volcanismo son principales activos y potentes fuentes de calor, siendo descargado en forma de gas y agua a altas temperaturas como por ejemplo las aguas termales.

Esta energía ha sido aprovechada de manera directa sobre sistemas de calefacción, agricultura, acuicultura [2] y demás usos industriales sustituyendo el uso de energías convencionales. Sin embargo, la búsqueda de energías renovables que aporten beneficios a la sociedad, a la economía y al progreso del país presenta la necesidad que más energías renovables y posibles potenciales sean estudiados para verificar su viabilidad y potencial en Colombia con el fin de invertir en energías que podrían suplir el déficit energético. El presente informe se basa en un análisis exhaustivo de factores técnicos, financieros y ambientales relacionados con la implementación de una central geotérmica en Colombia. El objetivo primordial es promover la inversión en esta forma de energía renovable con el fin de generar un impacto ambiental positivo.

Este informe proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en torno a la inversión en centrales geotérmicas. La combinación de factores técnicos, financieros y ambientales respalda la importancia de esta iniciativa como un paso significativo hacia un futuro energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente en Colombia.

1.1. Introducción

En el marco de la transición energética, la implementación y desarrollo de las fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER), son un reto que compromete a diferentes países a darle un cambio estructural en el tiempo, sobre el uso de los sistemas tradicionales de energización.

Se predice que el núcleo de la tierra se encuentra a una temperatura semejante a la temperatura que tiene el exterior del sol, y que se encuentra aproximadamente alrededor de los 5000°C. A lo largo de la historia se puede evidenciar que el calor que se encuentra reprimido en el subsuelo de la tierra es liberado a través de manifestaciones geotermales como lo puede ser volcanes, geiseres, y dorsales oceánicos; esto supone que, si un territorio o nación tiene un mayor número de volcanes, su potencial geotérmico es mayor. La generación de energía eléctrica por medio de plantas de generación geotérmica propone ser una de las mejores alternativas para sustituir los sistemas de energización tradicionales, ya que el costo de producción por kwh es el que más se acerca a los que actualmente hay hoy en el mercado. Por otro lado, las plantas de generación geotérmica son sistemas en los que por su condición geofísica utilizan un área de instalación menor en comparación con otras como las de producción por medio de hidroeléctricas.

Dado el contexto de Colombia, se sabe que la matriz energética de este es una de las más limpias del mundo debido a su riqueza hídrica lo que hace que su matriz se centre mayormente en la producción de energía eléctrica a través de centrales hidroeléctricas, pero, aun así, trae consigo un impacto ambiental grande como el deterioro del hábitat de especies nativas, la acumulación de sedimentos y la fragmentación entre la conectividad de ríos. Es por esto por lo que la implementación de fuentes no convencionales de energías renovables como la solar,

eólica, biomasa, geotérmica son la alternativa de solución para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En especial la geotérmica porque no depende de factores ajenos a esta como lo son el viento para la producción de energía eólica, o el sol para la producción de energía solar.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Mostrar un análisis técnico y financiero de la implementación de una central geotérmica desde la fase exploratoria hasta la fase de explotación y generación de energía eléctrica en Colombia en 2023.

1.2.2. Objetivos específicos

- Dar a conocer las principales manifestaciones hidrotermales que se registran desde el servicio geológico colombiano
- Clasificar por potencial de generación eléctrico los recursos hidrotermales con los que cuenta Colombia.
- Presentar el análisis económico de la implementación de una central de generación geotérmica, basados en las plantas que hoy en día están en operación a nivel mundial.
- Definir cuál es el proceso técnico para implementar una planta de generación geotérmica desde su exploración hasta su explotación
- Dar a conocer el estado del arte en temas regulatorios para la implementación de una planta de generación geotérmica en Colombia
- Presentar los tipos de plantas que existen para generar electricidad, y cuál sería la mejor opción de aplicación dependiendo la zona geográfica y las propiedades geofísicas.
- Dar a conocer los beneficios ambientales que se generan al producir electricidad por medio de plantas geotérmicas

1.3. Definición del Problema

En la actualidad, el cambio climático representa uno de los desafíos más apremiantes a nivel global. En los últimos años presentándose los periodos más cálidos en donde la temperatura de la tierra supera los valores más altos de los últimos 130.000 años [4]. Impulsando la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles. En el contexto colombiano, la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles ha exacerbado esta problemática al contribuir significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (Ayala, 2017). Esta realidad plantea la necesidad imperante de cambiar hacia fuentes de energía limpias que no solo reduzcan el impacto ambiental, sino que también promuevan la seguridad y rentabilidad energética del país.

En este sentido, la geotermia emerge como una oportunidad crucial para abordar este problema. Colombia, caracterizada por su rica actividad geotérmica debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico (zona de muy alta actividad volcánica y sísmica, localizada en la periferia del Océano Pacífico), posee un potencial significativo en este recurso energético (SGC, 2019). Sin embargo, a pesar de sus ventajas ambientales y su capacidad para proporcionar una fuente continua y confiable de energía eléctrica, la adopción de la geotermia enfrenta obstáculos como limitaciones tecnológicas, inversiones iniciales y consideraciones regulatorias.

Este artículo se propone explorar cómo la geotermia puede ser una solución efectiva para mitigar los efectos del cambio climático en Colombia. A través de un análisis detallado de los desafíos y las barreras actuales, se buscarán estrategias y soluciones para promover la integración exitosa de la geotermia en el panorama energético nacional. Al hacerlo, se pretende demostrar que la geotermia no solo ofrece una oportunidad segura y rentable para la generación de energía eléctrica, sino que también representa un paso crucial hacia la reducción de las

emisiones de gases de efecto invernadero y la consecuente mitigación del cambio climático en el país.

¿Cuál es el estado del arte regulatorio en Colombia para la implementación de plantas geotérmicas?

¿Cuál es el costo de producir un kW con energía geotérmica?

¿Cuál es el proceso exploratorio de un pozo para producción de energía geotérmica?

¿Cuál es el proceso de explotación para un pozo de generación de energía geotérmica?

¿Cuál será la rentabilidad en el tiempo por kW de energía eléctrica producida a partir de energía geotérmica?

¿Cuáles son los costos de exploración, explotación y generación de energía geotérmica?

¿Cuál es la huella de carbono que se genera al implementar esta energía?

¿Cuántas toneladas de CO₂ se dejan de emitir al implementar una planta de generación geotérmica?

¿Qué factores se tienen en cuenta para identificar el potencial geotérmico de una zona?

¿Qué tipo de planta es conveniente implementar dependiendo del potencial geotérmico?

1.4. Justificación

La implementación de energía geotérmica en Colombia desprende una serie de ventajas y usos al ser un tipo de fuente renovable ya que esta se obtiene a través del calor interno de la tierra, y no dependen de factores climáticos ni recursos agotables. Es un tipo de energía que está disponible de manera constante y que dependiendo el uso y su aprovechamiento se puede usar no solo para generar electricidad, sino que también se le puede dar un uso directo al aprovecharse para industrias de secado, cultivos, invernaderos, acuicultura, refrigeración o generación de hidrogeno verde. Por otro lado, el aprovechamiento de esta fuente renovable tiene ventajas dado

su bajo o nulo nivel de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la explotación y producción de energía a través de combustibles fósiles, lo que hace que contribuya a mitigar el cambio climático y disminuya la dependencia del ser humano frente a estos.

Finalmente encontramos que el aprovechamiento y producción de energía eléctrica a partir de distritos geotérmicos tiene unos bajos costos operativos a largo plazo, debido a que la fuente de calor o reservorio geotérmico es natural y continuo; esto sin contar con los beneficios sociales como la generación de empleo y pago de impuestos a la ciudad.

2. Análisis de Requerimientos

En todo el mundo, según el Informe sobre las Estadísticas de Capacidad Renovable 2021 de la IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables), el uso de la energía geotérmica para la generación de electricidad ha experimentado un incremento significativo, alcanzando un aumento de casi 8000 MW en capacidad instalada en 2020. Estados Unidos lidera la producción con 2700 MW.

Actualmente, en Colombia, se encuentra en funcionamiento un proyecto geotérmico ubicado en Maracas, en el departamento de Casanare, desarrollado por la empresa Parex. Adicionalmente, en colaboración con Ecopetrol, se están preparando proyectos adicionales de baja entalpía en Aguazul y Acacias. Estos proyectos aprovechan la infraestructura existente, como pozos perforados, para la extracción de fluidos geotérmicos, el tratamiento del aceite y la generación de electricidad, seguido de la reinyección de los fluidos (Parex, 2023).

A pesar de estos avances, la exploración y explotación de la energía geotérmica en Colombia no es común. La inversión limitada y la falta de conocimiento en esta área han generado incertidumbre al explorar esta opción.

Según Juan Esteban, Periodista de la Universidad Nacional de Colombia, el potencial de generación de energía geotérmica en Colombia es significativo, alcanzando los 16.603.100 gigavatios por hora (gWh), lo que equivale a 1,14 veces el consumo diario de electricidad en Bogotá.

El análisis técnico, financiero y ambiental propuesto tiene como objetivo simular la implementación de una central geotérmica en Colombia. Su finalidad es evaluar la viabilidad y los beneficios que se pueden obtener al aprovechar los recursos hidrotermales disponibles en el país, generando una fuente sostenible de energía eléctrica y contribuyendo al desarrollo del

conocimiento y la tecnología geotérmica en Colombia. Esto implica la identificación de las principales manifestaciones hidrotermales, la clasificación de su potencial, el análisis de la viabilidad de una central eléctrica, el abordaje de las regulaciones pertinentes y la proyección de los beneficios ambientales en el contexto colombiano.

De esta manera los parámetros de los cuales será guiado el proyecto estarán estipulados en la siguiente tabla:

Intención del parámetro	Parámetro de diseño	Requisitos y especificaciones	Verificación
Estudiar ubicaciones geográficas de manifestaciones geotérmicas	Ubicación geográfica	Filtrar reservorios con profundidad promedio adecuada a partir de datos del Servicio Geológico Colombiano	Descartar reservorios con temperaturas inadecuadas
Determinar el potencial de generación geotérmica	Temperatura o Potencial	Calcular el potencial mediante temperatura incremental (CVL) y modelos geoquímicos (GLC) (Gevorkian, 2010)	Aplicar metodologías para identificar fuentes termales para exploración
Evaluar la viabilidad de centrales geotérmicas en Colombia	Equipos técnicos	Analizar detalladamente el proceso técnico de implementación de centrales geotérmicas	Evaluar rentabilidad, beneficios, costos y dificultades de centrales geotérmicas en todo el mundo
Cumplimiento de regulaciones sobre energía geotérmica en Colombia	Aspectos ambientales y legales	Interpretar las leyes colombianas sobre energía renovable, yacimientos de agua, excavaciones y regulaciones ambientales	Resumir el marco legal y ambiental para proyectos geotérmicos y verificar su cumplimiento utilizando herramientas como ISO 14001

Análisis de riesgos ambientales	Aspectos Ambientales	Evaluar el impacto ambiental del proyecto desde la extracción de recursos hasta la disposición final utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA)	-
Calcular el costo de inversión para la implementación del proyecto geotérmico	Aspectos Financieros	Estimar los costos de construcción de la central, pozos geotérmicos, equipos e infraestructura utilizando métodos de análisis de Costo-Beneficio o análisis Costo-Efectividad	-
Análisis de flujos de caja	Aspectos Financieros	Evaluar la rentabilidad del proyecto considerando costos, ingresos e inversión inicial utilizando la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el método de Flujo de Caja Descontado (FCD)	-

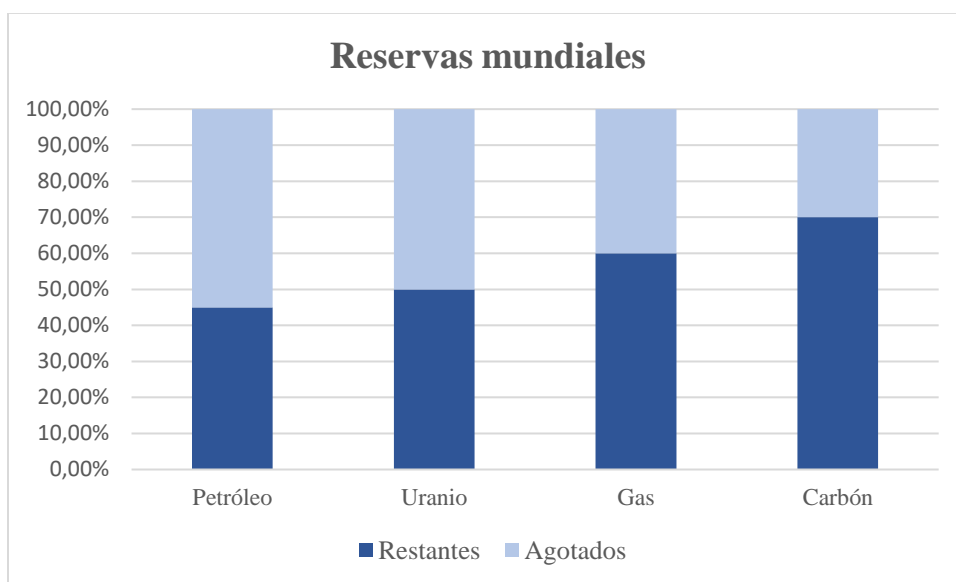
Tabla 1 Aspectos claves del proyecto, requisitos y verificaciones (Sujeto a cambios).

3. Marco De Referencia

3.1. Energías convencionales

La economía del mundo de hoy se ha construido en torno a los combustibles fósiles, se han preferido productos manufacturados por encima de productos artesanales lo que transforma totalmente la manera de consumir. Pero en los últimos años los avisos sobre el cambio climático, la falta de sostenibilidad y la contaminación nos lleva a una situación indefensa donde el previsible aumento de los precios de la energía y los futuros problemas de abastecimiento no obliga a recurrir a las energías renovables.

A partir del estudio publicado en el libro “El colapso es inevitable” de Elisa Pulla se estudia como las energías convencionales se están agotando y como es su proyección en los próximos años. En este libro usan el Tera vatio año (TWa), es una unidad para expresar la energía de mil millones de kilovatios que permaneciera encendida de manera constante por un año. Ahora, hablando de las necesidades energéticas supondrían al 1.100 TWa. Sin embargo, ya hemos usado de forma irreversible 646 TWa. Especialmente el petróleo es más lo consumido (236 TWa) que lo restante (197 TWa).



Gráfica 1 Reservas mundiales de petróleo, uranio, gas y carbón; Comparación entre reservas restantes y agotados. Fuente: Carles Riba y adaptado de “El colapso de inevitable” de Elisa Pulla.

Teniendo en cuenta que para el año 2050 las necesidades energéticas mundiales serán superiores en un 50% pasando a un consumo de 28 TW, no se puede seguir usando las energías convencionales si recursos como el uranio, petróleo, gas y carbón son quemados sin retorno.

Las energías renovables se consideran como flujos energéticos inagotables (Como el viento, el sol o el agua, por mucho que se utilicen no hará que se disminuya. Los aspectos que afectan directamente a estas energías son económicos, energéticos y medioambientales, en este caso el aspecto económico sería el único que se ve limitado.

3.2. ¿Qué es la energía geotérmica?

El termino de Geotermia se deriva de la composición griega: geo, que significa “tierra”, y therm, que significa “calor”. Unificado, la geotermia se define como el calor que se almacena al interior de la tierra y se origina en el núcleo del planeta por su composición de hierro fundido y níquel, situado a unos 6000 km de profundidad desde la corteza. Se estima que el núcleo de la tierra alcanza los 5000 °C, calor que se conduce hacia afuera desde el interior del núcleo y calienta las capas exteriores (núcleo externo, manto y corteza). Cuando este calor se expulsa fuera de la corteza se denomina “magma”. El proceso para generar electricidad a través del calor que almacena la tierra implica la perforación de pozos, que llegan a los reservorios geotermiales: “sitios del subsuelo donde se concentra la energía geotérmica”. Esta energía sale a la superficie en forma de vapor, y este a su vez se utiliza para impulsar turbinas de generación eléctrica. La capacidad energética que genera esta energía se mide mediante la Entalpia, una magnitud termodinámica representa la diferencia de temperatura existente en dos cuerpos en este caso

entre el subsuelo y la superficie. La geotermia de entalpia alta posee valores superiores a los 120°C y por lo general de aquí se genera el mayor aprovechamiento de fuentes subterráneas de calor como fuentes termales, zonas activas y volcanes. La geotermia de media entalpia posee valores entre 50°C – 120°C. Y por ultima, la geotermia de baja entalpia posee temperaturas por debajo de 50°C ya se debería considerar un sistema de bomba de calor la cual utiliza la temperatura del subsuelo de poca profundidad para sistemas de calefacción más utilizados en hogares o cultivos.

3.2.1. ¿Por qué se considera una fuente de energía renovable?

Se considera renovable por el bajo impacto ambiental respecto a las energías convencionales, menos emisiones de gases efecto invernadero y solidos suspendidos en el aire. Además no requiere la ocupación de grandes extensiones de tierra para su desarrollo. A diferencia de otras energías renovables la geotermia no depende de variaciones climáticas y su aprovechamiento es local generando energía las regiones aledañas.

3.3. Sistemas Geotérmicos

Actualmente se han identificado 9 tipos de sistemas geotérmicos

3.3.1. Sistema geotérmico hidrotermal

El sistema geotérmico hidrotermal es el sistema comúnmente más usado y convencional. Se identifican por disponer de agua subterránea caliente proveniente del calor interno de la tierra, lluvias y deshielos. Puede encontrarse en estado líquido y/o gaseoso.

3.3.2. Sistemas geotérmicos mejorados

Los sistemas geotérmicos mejorados se caracterizan por estar constituidos por rocas impermeables a temperaturas altas y por carecer de acuífero, por lo tanto, el fluido y el reservorio se logran artificialmente. En este caso, se bombea agua a alta presión a través de pozos hasta un

cuerpo de rocas calientes y compactas causando así su estimulación hidráulica, la cual consiste en aumentar la permeabilidad del reservorio mediante la generación de fracturas. El agua circulará en estas fracturas artificiales, extrayendo el calor de la roca circundante que actúa como un reservorio natural. Este reservorio es posteriormente alcanzado por un segundo pozo que se emplea para extraer el agua calentada. Todo el sistema, juntamente con la planta de utilización en la superficie del terreno, puede conformar un circuito cerrado.

La tecnología EGS, además de utilizarse para crear yacimientos de alta temperatura nuevos, también puede aplicarse para aumentar la extensión de reservorios que están actualmente en producción y así incrementar las reservas geotérmicas.

3.3.3. Sistemas geotérmicos con yacimientos geo presurizados

Están asociados principalmente a cuencas sedimentarias profundas. En este tipo de sistemas, el fluido geotérmico (agua caliente o vapor) se encuentra confinado bajo altas presiones en formaciones geológicas subterráneas. Al liberar esta presión de manera controlada, se puede utilizar la expansión del fluido para generar energía eléctrica mediante turbinas o para aplicaciones de calefacción directa.

La principal ventaja de los yacimientos geo presurizados es su alta presión, lo que puede facilitar la producción de energía con una mayor eficiencia. Sin embargo, trabajar con estas altas presiones también conlleva desafíos técnicos y de seguridad.

El fluido en estos sistemas se encuentra a grandes profundidades (6000m o más) y sometido a altas presiones (entre un 40 y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad que se encuentra), sin embargo, las temperaturas no suelen ser extremadamente altas (Entre 90 y 200°C). Este fluido suele coexistir con gases naturales como el metano lo que dificulta su explotación en la actualidad.

3.3.4. *Sistemas geotérmicos asociados a cuencas sedimentarias*

Son aquellos que se encuentran dentro o alrededor de cuencas geológicas llenas de sedimentos. Estas cuencas sedimentarias pueden contener aguas subterráneas calientes o reservorios geotérmicos asociados a formaciones sedimentarias.

Estos sistemas se diferencian de los sistemas geotérmicos convencionales, que suelen estar asociados con formaciones rocosas más antiguas o vulcanismo activo. En las cuencas sedimentarias, el calor puede generarse a través de procesos geotérmicos distintos, como la migración de fluidos subterráneos a través de capas permeables de sedimentos o la presencia de gradientes térmicos naturales en estas áreas.

La exploración y explotación de sistemas geotérmicos en cuencas sedimentarias generalmente implican técnicas específicas adaptadas a las características geológicas y geotécnicas de estas formaciones, ya que pueden presentar desafíos diferentes a los sistemas geotérmicos convencionales.

3.3.5. *Sistemas geotérmicos radiogénicos*

se refieren a aquellos que obtienen su energía principalmente de la radiactividad natural presente en el subsuelo terrestre. Esta radiactividad proviene de elementos como el uranio, el torio y el potasio presentes en las rocas y minerales que componen la corteza terrestre.

La desintegración radiactiva de estos elementos genera calor como subproducto, y este calor puede acumularse en el subsuelo, aumentando la temperatura de las capas geológicas. En algunos casos, este calor puede ser lo suficientemente intenso como para calentar agua subterránea o generar vapor, que luego puede ser aprovechado para la generación de electricidad o aplicaciones de calefacción.

3.3.6. Sistemas geotérmicos marinos

Sistemas en los que el fluido geotérmico dominante es el agua de mar calentada durante su circulación por el interior de la tierra. Estos pueden manifestarse como descargas hidrotermales, chimeneas o fumarolas.

3.3.7. Sistemas geotérmicos supercríticos

Los sistemas geotérmicos supercríticos son una forma avanzada de tecnología geotérmica que aprovecha temperaturas y presiones muy altas en el subsuelo para generar electricidad. Estos sistemas operan con fluidos geotérmicos que se encuentran en estado supercrítico, es decir, en un estado donde no se distingue claramente entre líquido y vapor debido a la alta temperatura y presión, exhibiendo propiedades únicas.

En condiciones supercríticas, el fluido geotérmico puede transportar más calor y, por ende, generar más electricidad con mayor eficiencia en comparación con los sistemas convencionales de generación geotérmica. Estos sistemas permiten alcanzar una mayor eficiencia térmica y generar más energía a partir de un mismo recurso geotérmico.

3.3.8. Sistemas geotérmicos de agua caliente asociados a yacimientos de petróleo y gas

El agua caliente puede ser coproducida con petróleo, o extraída a partir de pozos petroleros abandonados por no tener una producción rentable o el agotamiento del yacimiento. Durante la extracción de petróleo o gas, se libera una cantidad significativa de agua caliente o vapor, ya que estas sustancias a menudo se encuentran a altas temperaturas y presiones en las profundidades de la Tierra. Esta agua caliente o vapor puede ser utilizada como una fuente adicional de energía geotérmica.

3.3.9. *Sistemas geotérmicos magmáticos*

Los sistemas geotérmicos magmáticos surgen en asociación con la actividad volcánica y la presencia cercana de magma en la corteza terrestre. Su distintivo radica en el intenso calor generado por el magma subterráneo, el cual calienta las rocas circundantes y eleva las temperaturas del agua subterránea a niveles extremadamente altos.

La energía geotérmica en estos sistemas proviene directamente del calor producido por el magma o la actividad volcánica adyacente. Esta elevada temperatura puede ocasionar la formación de agua caliente o vapor que se eleva hacia la superficie, originando fuentes termales o géiseres. Esta energía puede ser aprovechada para generar electricidad o aplicaciones directas de calefacción.

Estos sistemas se encuentran predominantemente en áreas geológicamente activas, cercanas a zonas volcánicas o a los límites de placas tectónicas, facilitando la infiltración del calor del magma más cerca de la superficie. Tales lugares presentan un potencial significativo para la generación de energía geotérmica debido a las temperaturas elevadas disponibles.

3.4. Generalidades de la clasificación y usos de los recursos geotérmicos

El uso que se le puede dar a un recurso geotérmico depende de su entalpía, es decir de la cantidad de calor que un fluido puede intercambiar con su entorno. Para clasificar el recurso geotérmico se utiliza la temperatura del reservorio ya que es proporcional a la entalpía de los fluidos del subsuelo o reservorio.

3.4.1. *Reservorios de alta entalpía*

Los reservorios de alta entalpía son depósitos subterráneos de origen geotérmico que albergan fluidos a temperaturas y presiones extraordinariamente elevadas. Estos reservorios se

destacan por su inmensa carga de energía térmica y representan una fuente sumamente prometedora de calor.

La "entalpía" abarca la energía total contenida en un sistema termodinámico, incorporando tanto su energía interna como su presión y volumen. En el contexto de la energía geotérmica, un reservorio de alta entalpía indica que el fluido geotérmico, ya sea agua caliente o vapor, se encuentra a temperaturas que superan los 150 °C y a presiones considerables en comparación con otros depósitos.

Estos reservorios son altamente valorados en la industria geotérmica, dado que el agua caliente o vapor a elevadas temperaturas y presiones pueden ser convertidos de manera más eficiente en electricidad o empleados en aplicaciones directas de calefacción y procesos industriales. Considerados como recursos geotérmicos de primera categoría, los reservorios de alta entalpía poseen un potencial considerable para generar cantidades significativas de energía renovable.

3.4.2. Reservorios de mediana entalpía

Los reservorios de mediana entalpía son depósitos geotérmicos subterráneos que albergan fluidos a temperaturas y presiones más moderadas en comparación con sus homólogos de alta entalpía. Estos reservorios se caracterizan por mantener temperaturas que generalmente oscilan entre los 70 °C y los 150 °C, con presiones variables.

Aunque las condiciones térmicas y de presión en los reservorios de mediana entalpía son menos extremas que en los de alta entalpía, siguen siendo una valiosa fuente de energía geotérmica. Estos depósitos pueden emplearse para aplicaciones directas de calefacción, así como en usos industriales como el secado o procesos que requieran calor a temperaturas moderadas.

3.4.3. Reservorios de baja entalpia

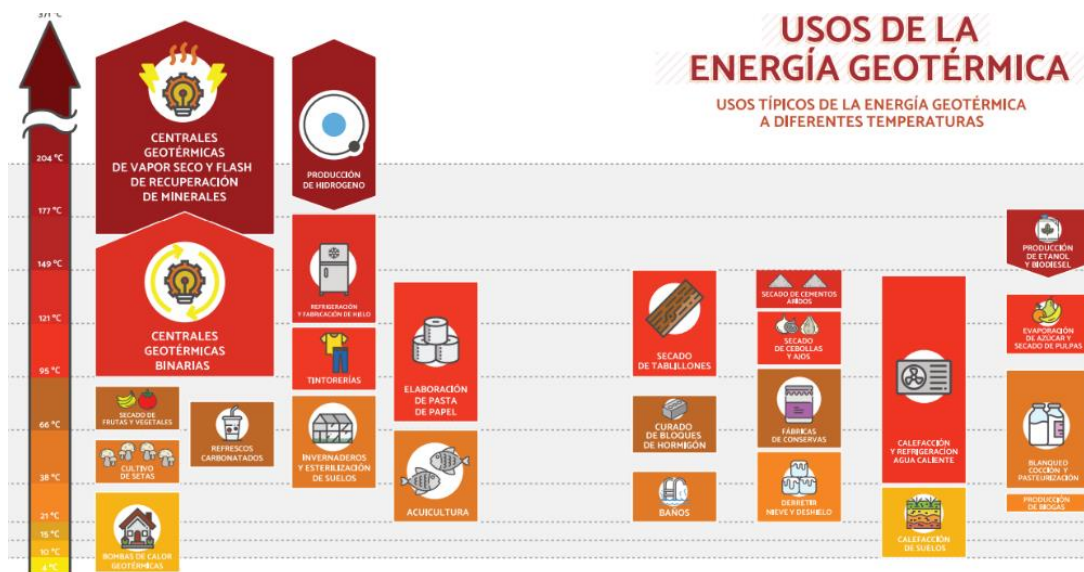
Estos reservorios, se caracterizan por albergar depósitos con fluidos que se encuentran a temperaturas entre los 30 °C a los 70°C.

A pesar de que sus temperaturas son relativamente bajas en comparación con los de mediana y alta entalpia, suelen ser usados como fuente de energía geotérmica para aplicaciones como la calefacción en edificios residenciales, el cultivo en invernaderos, recreación de balnearios, cría de peses y otros usos que requieren de un calor moderado o bajo.

3.5. Usos del recurso geotérmico de acuerdo con su temperatura

Como se explicó anteriormente la clasificación de los reservorios, en la Ilustración 2, el Servicio Geológico Colombiano muestra una aproximación de los usos típicos de la energía geotérmica a diferentes temperaturas.

Ilustración 2: Usos de la energía Geotérmica



(Servicio Geológico Colombiano, 2019)

3.6. Tipos de Centrales de Generación geotérmica

Las centrales de generación geotérmica son las instalaciones que aprovechan el calor proveniente del subsuelo para producir electricidad u obtener calor directamente para fines

aprovechables. Existen varios tipos de centrales de generación geotérmica, y cada una cuenta con un proceso de extracción y conversión de la energía geotérmica diferente:

3.6.1. *Plantas geotérmicas de vapor directo*

Los almacenamientos geotérmicos de vapor seco contienen una temperatura de 180° a 350° C, pero este recurso es difícil de encontrar. Se extrae por medio de perforaciones o pozos y se alimenta directamente a la turbina de vapor; varios pozos pueden alimentar una turbina.

También presentan una característica en los tubos que alimentan de vapor a la planta geotérmica, ya que contienen varios filtros para retirar partículas de roca y vapores que se condensan en la trayectoria.

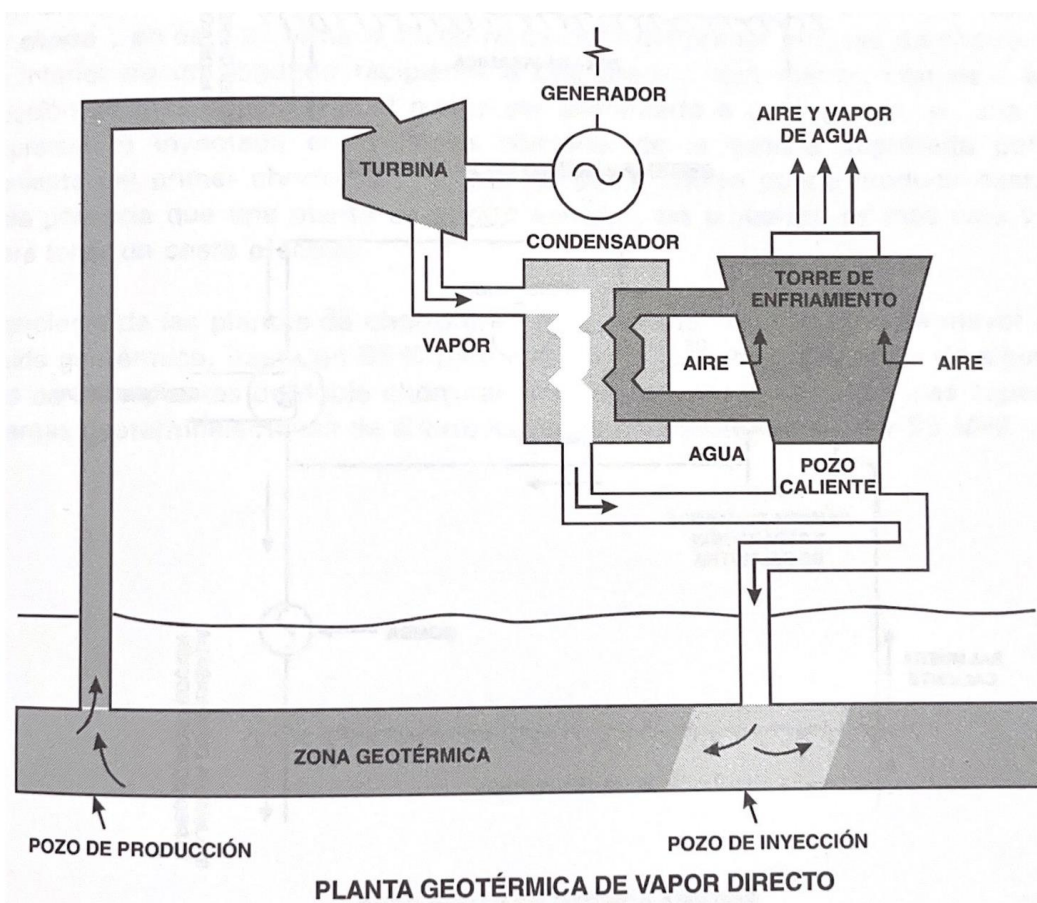


Ilustración 1 planta geotérmica de vapor directo Recuperada del libro Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica

La turbina por lo general es una turbina estándar de reacción (motor giratorio que aprovecha la energía de los fluidos a partir de la Tercera Ley de Newton). La eficiencia es baja, alrededor del 30%, y el tamaño de las unidades en las plantas modernas están entre 20 y 120 MW. En algunos casos el vapor sale directamente a la atmosfera, pero este vapor puede contener otros gases, por ende, se debe condensar adquirir agua y tratarla para retirar los contaminantes presentes antes de liberarlo a la atmosfera.

3.6.2. Plantas geotermoeléctricas de chorro de vapor

La mayoría de los almacenamientos geotermoeléctricos ceden fluidos, por lo general resulta una mezcla de vapor y salmuera líquida. El método más simple para explotar el recurso depende de usar el fluido solamente para accionar una turbina de vapor sin embargo esto deja mucha energía desperdiciada, particularmente donde la proporción de vapor es más pequeña.

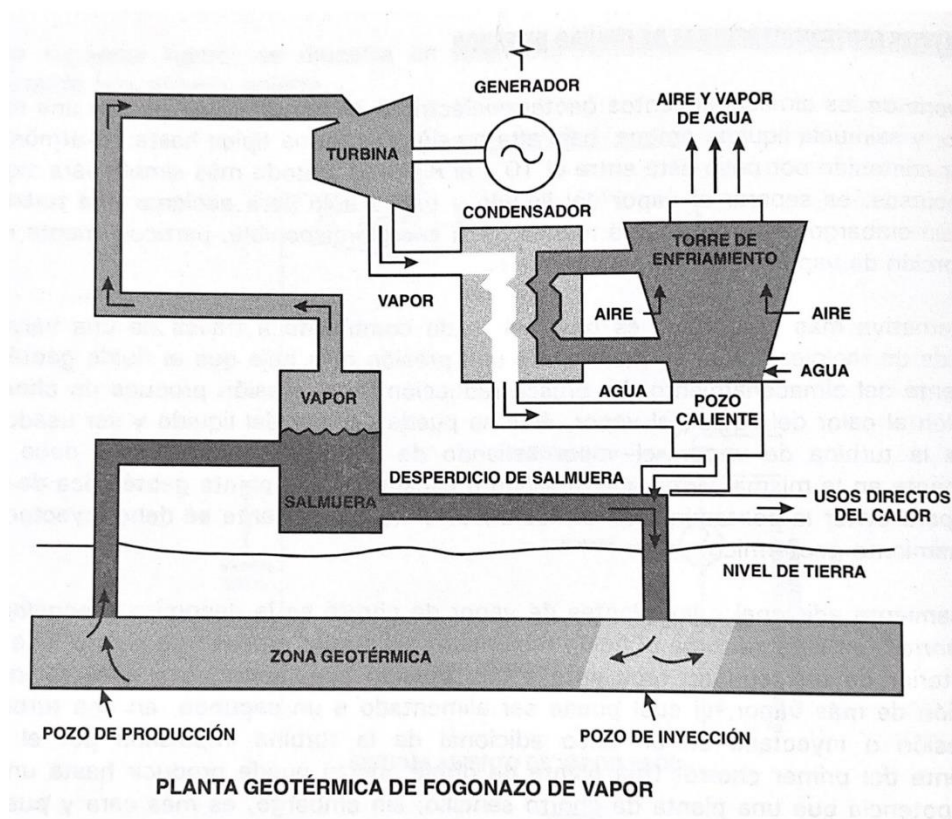


Ilustración 2 Planta geotérmica de chorro de vapor diagrama. Recuperado del libro "Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica"

Una alternativa más productiva es pasar el fluido combinado a través de una válvula al interior de un recipiente para mantener una presión más baja de donde proviene el fluido geotérmico, esta reducción de presión produce un chorro en proporción al calor del líquido al vapor, de este modo se puede separar del líquido y ser usado para accionar la turbina de vapor.

Se debe tratar inmediatamente el escape del fluido de la planta geotérmica para evitar contaminación en la atmósfera, el líquido restante se debe inyectar en el almacenamiento geotérmico.

Un refinamiento adicional se denomina “Tecnología de doble chorro, en esta se toma el fluido restante del primer proceso de chorro se libera en segundo recipiente a una presión aún menor con esto se logra la producción de más vapor para el cual puede alimentar una segunda turbina de baja presión o se inyecta en un paso adicional en la turbina impulsada por el valor proveniente del primer chorro. Una planta de doble chorro puede producir hasta un 25% más de potencia hoy sin embargo es más cara y no siempre tiene un costo efectivo.

Hoy la tecnología de las plantas de chorro contiene un retorno de mayor porcentaje de fluido geotérmico, en promedio de un 85%. Las capacidades de las plantas geotermoeléctricas de chorro están normalmente entre 20 y 55 MG.

3.6.3. Plantas geotermoeléctricas binarias

Las plantas geotermoeléctricas de vapor directo y de chorro de vapor utilizan el fluido geotermoeléctrico con una temperatura entre 180 y 350°C. Si el fluido es más frío, la tecnología de vapor convencional es bastante ineficiente y económicamente inviable. Sin embargo, la energía puede ser extraída del fluido para generar potencia usando una Planta Geotermoeléctrica Binaria.

En una planta geotermoeléctrica binaria, el fluido se extrae del almacenamiento y se hace pasar a través de un cambiador de calor donde el calor que contiene se usa para volatilizarse un segundo fluido. Este segundo fluido se contiene dentro de un sistema de ciclo cerrado y puede ser un líquido orgánico que se vaporice a una temperatura relativamente baja o bien una mezcla de agua y amoníaco.

El fluido secundario vaporizado se usa para accionar la turbina, que a su vez acciona al generador eléctrico de la turbina. El vapor es condensado y luego bombeado a través del cambiador de calor una vez más, entonces el ciclo se repite.

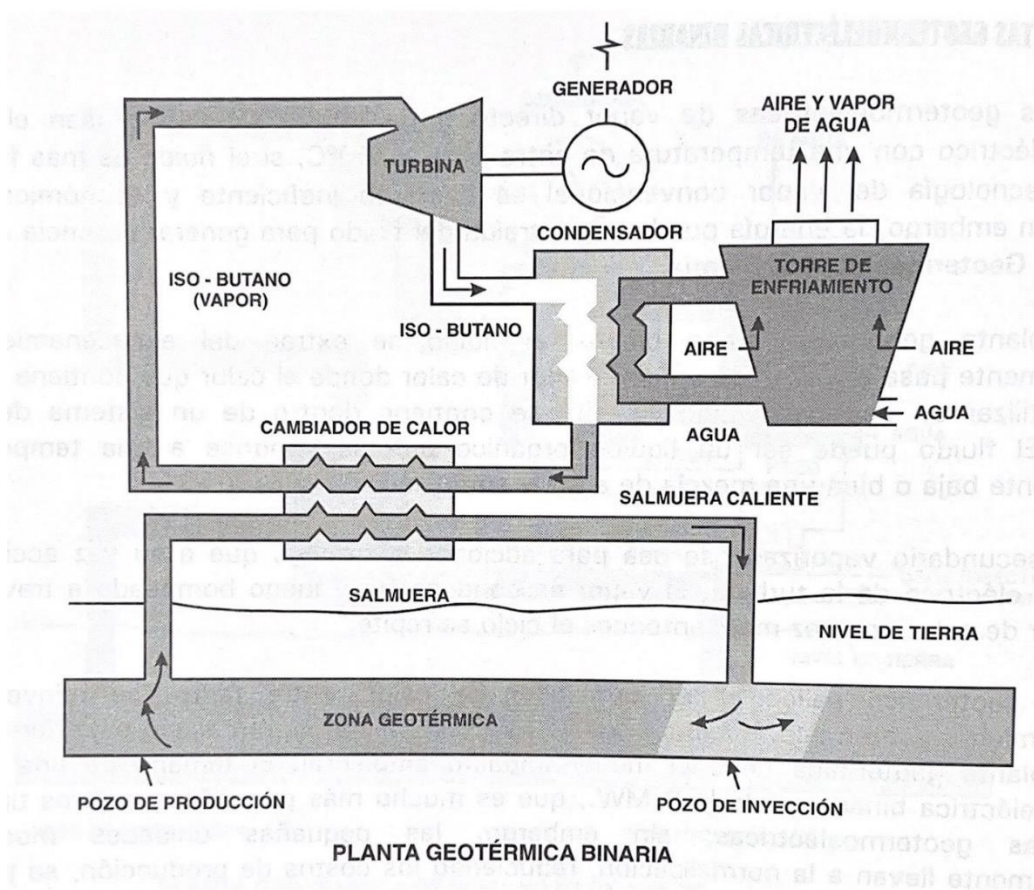


Ilustración 3 Diagrama de Planta geotérmica binaria. Recuperada de "Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica"

El fluido geotérmico saliendo del cambiador de calor se reinyecta al almacenamiento geotérmico. Debido a que el 100% del fluido es regresado bajo tierra, este tipo de planta geotérmica tiene el menor impacto ambiental. El tamaño de una planta geotermoeléctrica binaria es de 3 MW, que es mucho más pequeño que otros tipos de tecnologías geotermoeléctricas. Sin embargo, las pequeñas unidades frecuentemente llevan a la normalización, reduciendo los costos de producción. Varias unidades se pueden conectar en paralelo para integrar una planta en una mayor potencia de salida.

Aunque la aplicación manual de la tecnología binaria es para explotar un recurso geotermoeléctrico de baja temperatura, la tecnología se puede usar para generar más potencia de una planta de chorro.

3.7. Servicio Geológico Colombiano

El Servicio Geológico Colombiano tiene la misión de explorar los recursos geotérmicos y ponerlos a disposición en el “inventario nacional de manifestaciones hidrotermales”. En esta clasificación se integra información como la localización, la descripción de manantiales termales y fumarolas y además la composición química que ofrece. Esta información nos ayuda a localizar y caracterizar los yacimientos geotérmicos para que a partir de estos datos se estudió en el que más nos interesa sería la temperatura del fluido termal (agua coma vapor y gases) teniendo en cuenta el diagrama lindal (Gudmundsson, Freeston y Lienau, 1985) sobre el uso típico de la energía geotérmica a diferentes temperaturas expresa que la temperatura ideal para generar energía centrales geotérmicas binarias Empieza desde los 95 °C o desde los 75 °C gracias al avance tecnológico, y para centrales geotérmicas de vapor seco y flash de recuperación de minerales se necesitan temperaturas superiores a los 160°C.

El inventario que nos otorga servicio geológico colombiano nos puede ayudar a encontrar manantiales y fumarolas entre los 40 °C a los 173 °C lo que es un acercamiento a puntos claves para implementar una central geotérmica en donde las excavaciones sean precisas y eficientes.

3.8. Potencial Geotérmico en Colombia

Colombia posee condiciones

geográficas favorables que la convierten en un lugar atractivo para la explotación del recurso geotérmico con el propósito de generar

electricidad. Esto se debe a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, lo que resulta en una notable actividad volcánica, especialmente en las cordilleras Occidental y Central. Además, se observa actividad ígnea latente en ciertas áreas de la cordillera Oriental.

En total, la región alberga alrededor de 15 volcanes activos y numerosos inactivos, lo que contribuye al potencial geotérmico del país.

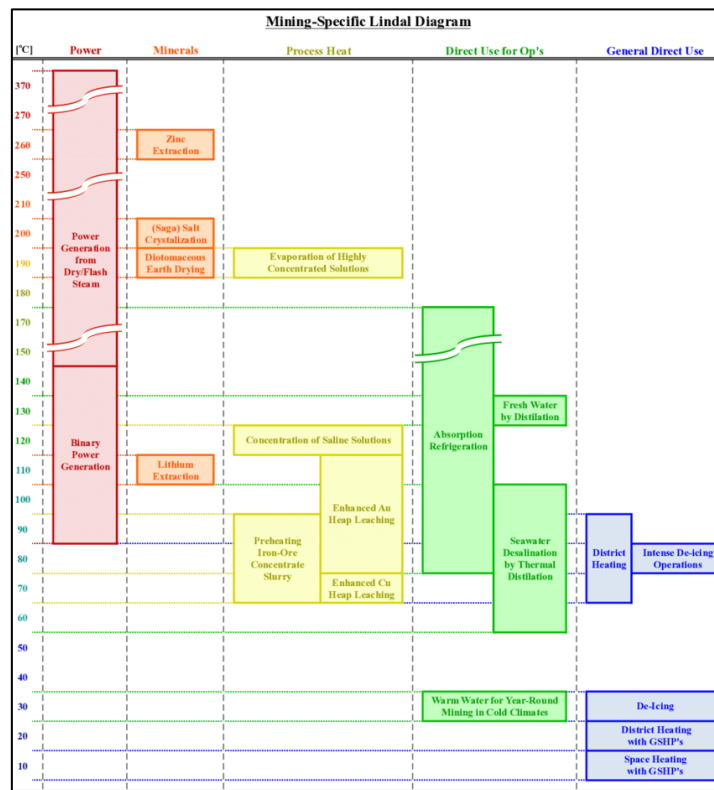


Ilustración 4 Diagrama Lindal, 1985

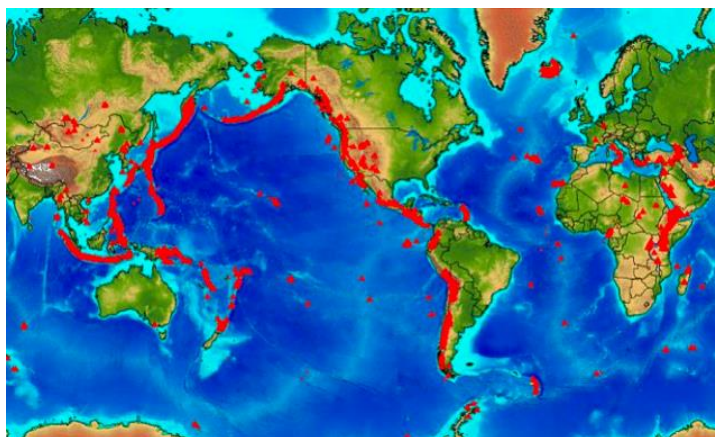


Ilustración 5. Cinturón del fuego del pacifico. Fuente: Análisis de la energía geotérmica como alternativa para el abastecimiento

3.9. Análisis Económico de Centrales Geotérmicas

Los proyectos de energía, en especial aquellos de naturaleza renovable se caracterizan por altas incertidumbres y esto se refleja en los flujos de caja que maneja el proyecto, afectado o apoyando la continuación (Knaut, 2013). Existen diversas variables que afectan el rendimiento en un sistema geotérmico, por ejemplo, la temperatura, el caudal y la presión, lo que genera alta incidencia en la factibilidad financiera del proyecto la optimización de estas variables generaría efectos positivos en términos energéticos y económico de este modo es importante tener en cuenta la constante exploración y excavación ya que a mayor distancia del pozo las variables aumentan positivamente.

Hoy la implementación de una central eléctrica depende de inversionistas que pueden aportar un capital dentro de hoy las fases del proyecto a partir de esto generar una proyección de rentabilidad a partir de las fases de desarrollo.

Conviene subrayar que la implementación de una central geotérmica se puede desarrollar en fases, según Yessenia Martínez-Ruiz decide plantear 3 fases: Fase de exploración (3 años), fase de perforación (2 años) y fase de desarrollo (3 años), obteniendo 8 años en periodo de inversión y por consiguiente unos 20 años de operación. Concluyendo que la rentabilidad de proyecto sería rentable en un promedio de 7 años.

3.10. Marco Regulatorio para Plantas Geotérmicas en Colombia

La regulación de la geotermia en Colombia se remonta a 1974, cuando se promulgó el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente (Decreto Ley 2811 de 1974). En ese momento, se reconoció la importancia de desarrollar fuentes de energía no convencionales con un enfoque en la preservación del medio ambiente. Sin embargo, a pesar de este inicio, el avance en el campo de las energías no convencionales fue limitado.

En 2014, se dio un paso significativo con la promulgación de la Ley 1714, que estableció un marco regulatorio para las fuentes no convencionales de energía renovable, incluida la geotermia. Este marco regulatorio tiene como objetivo principal fomentar la exploración y explotación del recurso geotérmico con fines de generación de energía eléctrica en Colombia. Esta ley otorgó al Ministerio de Minas y Energía la responsabilidad de definir los requisitos técnicos y los procedimientos necesarios para la exploración y explotación geotérmica, además de supervisar, controlar y aplicar sanciones en caso de incumplimiento. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por su parte, se encargó de establecer los parámetros ambientales que debían cumplir los proyectos geotérmicos, así como de abordar cualquier impacto ambiental durante su implementación. La ley también prohibió expresamente la realización de proyectos geotérmicos en áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

Simultáneamente, se implementaron las siguientes medidas:

- **Registro Geotérmico:** Se creó un registro geotérmico a cargo del Servicio Geológico Colombiano, que recopila información de todos los proyectos de exploración y explotación con fines de generación de energía eléctrica. Esto contribuye al conocimiento del subsuelo y el potencial geotérmico del país.
- **Contraprestación:** Se estableció un mecanismo de contraprestación para quienes deseaban desarrollar proyectos de generación eléctrica, con el objetivo de delimitar las áreas de operación.
- **Información requerida:** Se especificaron los tipos de información que debían proporcionarse en el registro geotérmico.

La Ley 1715 de 2014 y sus posteriores modificaciones, como los artículos 21 y 21-1 (Ley 2099 de 2021), llevaron a la creación del Decreto Reglamentario 1318 de 2022. Acompañado por

la Resolución No. 40302 del 5 de agosto de 2022, estos documentos contienen los requisitos y condiciones necesarios para llevar a cabo actividades geotérmicas con el fin de fomentar la exploración y explotación del recurso geotérmico con el propósito de generar energía eléctrica.

Las regulaciones abordan dos tipos de usos:

- **Usos en cascada:** Estos hacen referencia a la utilización de la energía térmica para la generación de energía eléctrica. Este uso está sujeto a una regulación estricta y requiere permisos específicos.
- **Usos directos:** Implican el aprovechamiento directo del calor sin su conversión en energía eléctrica, como la calefacción o la operación de invernaderos. Aunque no requieren permisos según el decreto, deben cumplir con las leyes aplicables y asegurarse de no afectar a áreas con potencial eléctrico y permisos de explotación existentes.

3.10.1. Fases de un proyecto geotérmico y su regulación

El proceso necesario para la creación de una central geotérmica se divide en tres etapas, conforme al Decreto 2099 de 2022. Estas etapas se detallan a continuación, exponiendo los pasos requeridos para la obtención de permisos de exploración y explotación.

1. **Actividades de reconocimiento y prospección:** Estas etapas iniciales incluyen la observación de la zona, la creación de cartografía geológica, la toma de muestras manuales y mediante sensores remotos, y el uso de métodos geofísicos de prospección indirecta para recopilar datos del subsuelo.

En esta fase, se realizan análisis exhaustivos de las características geológicas del área, se genera la cartografía necesaria y se completan los trámites para avanzar en el proyecto. Se presentan los documentos necesarios para solicitar el permiso de exploración, que incluyen:

- Una base de datos geoespacial (GDB) en proyección cartográfica Transversal de Mercator con un origen nacional definido en coordenadas geográficas Magna-Signal, que abarque el área geotérmica y sus vértices correspondientes.
- Acreditación de la capacidad técnica.
- Documento que incluye el análisis de las principales características geológicas del área solicitada

Propuesta técnico-financiera: Se debe presentar una propuesta técnico-financiera que detalle las actividades a realizar, indicando la duración, el presupuesto y la naturaleza de cada una. Algunas actividades para desarrollar son:

- Primera exploración superficial: Descripción de técnicas y número de puntos o estaciones de adquisición.
- Segunda preparatoria a la perforación exploratoria: Lista de trámites, permisos, licencias, y descripción de adecuación y construcción de infraestructura.
- Tercera perforación y evaluación: Número de pozos exploratorios, evaluación de pozos y potencial del campo.
- El avance se registra en informes ejecutivos, desglosados en períodos de tres meses. La garantía se actualizará si se modifica el programa o aumenta el monto del desarrollador.

Criterios de Rechazo: El permiso puede ser rechazado si la solicitud está incompleta, la información es poco clara, existe superposición con otro proyecto o no se obtiene el consentimiento previo. La vigencia del permiso es de 5 años desde la inscripción, con la posibilidad de prórroga por 3 años, siempre que se cumplan las condiciones mínimas. Si no se continúa con la explotación, el desarrollador debe restaurar el área de exploración y tomar medidas para mitigar y compensar los efectos negativos.

2. ***Etapa de exploración:*** En esta fase, se busca determinar la existencia y las condiciones del recurso geotérmico necesario para generar energía eléctrica. Se realizan investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas, así como estudios sísmicos, modelos y obras para confirmar la existencia del recurso geotérmico mediante perforaciones. Se solicita el permiso al Ministerio de Minas y Energía, que puede ser otorgado o denegado. En caso de aprobación, el proyecto se registra en el registro geotérmico, y el desarrollador obtiene derechos exclusivos sobre el área durante la vigencia del permiso y la prioridad para solicitar un permiso de explotación en el área de exploración.

Solicitud de Permiso de Explotación

- Base de datos geoespacial (GDB) cartográfica.
- Documentos que acrediten capacidad jurídica.
- Documentos que acrediten capacidad técnica.
- Reporte de cumplimiento del programa técnico financiero de la etapa de exploración, demostrando el potencial y recurso geotérmicos.
- Propuesta del programa técnico financiero de la etapa de explotación para generar energía.

- Características del proyecto técnico que incluyen capacidad instalada esperada, nivel de tensión de conexión, punto de conexión aprobado por la UPME o transportador, características de la línea de transmisión, y certificación de representante legal.

Programa Técnico-Financiero para el Permiso de Exploración

El programa detalla:

- Descripción de los pozos exploratorios adicionales.
- Descripción de los pozos productores e inyectores.
- Propuesta inicial de tamaño y tecnología de la central de generación.
- Informe de evaluación de potencia geotérmica y existencia de recurso geotérmico basado en la etapa de exploración.
- Especificación de minerales a aprovechar, tipo y concentración.
- El permiso de explotación tiene una vigencia de 30 años, con la posibilidad de prórroga por un periodo equivalente.

Solicitud de Registro Exploración
(Duración 5 años)

Para comprobar el Recurso se debe confirmar
con la perforación de al menos 1 pozo

Solicitud de prórroga Exploración
(Duración 3 años)

Ilustración 6

3. ***Etapa de explotación:*** En esta etapa, el desarrollador realiza actividades destinadas a aprovechar el recurso geotérmico en el área de explotación para la generación de energía eléctrica. No es necesario un registro adicional, pero el proyecto debe cumplir con las leyes ambientales pertinentes para prevenir impactos negativos en los yacimientos.

Se deben considerar los siguientes lineamientos técnicos para el diseño de los pozos, la planificación de las actividades de preparación y la selección de los equipos e instrumentos a utilizar, entre otros aspectos como:

- **Equipo de Perforación:** Se establecen requisitos para el equipo de perforación, considerando factores como diámetro, profundidad, cargas, capacidad de bombeo de fluidos, operación a altas temperaturas y gases corrosivos, y aspectos de seguridad.
- **Fluidos de Perforación:** Se especifican las propiedades de los fluidos de perforación para garantizar enfriamiento, limpieza, lubricación de la sarta de perforación y un funcionamiento óptimo bajo condiciones de temperatura esperadas.
- **Tubería de Revestimiento:** La instalación de tuberías de revestimiento es fundamental para proteger acuíferos, controlar el pozo, aislar zonas poco consolidadas y garantizar la integridad del pozo.
- **Cementación:** Se describe el proceso de cementación de las tuberías, diseñado para resistir altas temperaturas e interacciones químicas.
- **Sistemas de Prevención:** Se exige la presencia de equipos de control del pozo y tecnologías adecuadas para prevenir y mitigar riesgos operacionales.
- **Distancias Seguras:** Se establecen distancias seguras desde el pozo a diversas instalaciones, como oleoductos, talleres, casas de habitación y líneas de transmisión eléctrica.

Con este proceso técnico, se garantiza la implementación de plantas geotérmicas de manera segura y eficiente.

Cumplimiento de Normas de Abandono de Pozos

El desarrollador debe cumplir con las normas de abandono de pozos, siguiendo los lineamientos técnicos que se detallan a continuación.

4. Análisis de Restricciones

La transición hacia fuentes de energía renovable es una lucha constante contra el cambio climático y la búsqueda de un futuro energético más limpio y sostenible. En este contexto, la implementación y desarrollo de fuentes de energías renovables, particularmente la energía geotérmica, han ganado relevancia en Colombia. No obstante, la implementación de una central geotérmica no está exenta de desafíos y restricciones que deben ser cuidadosamente evaluados y abordados. Estas restricciones abarcan aspectos técnicos, económicos, legales, ambientales y socioculturales que pueden influir en el éxito y la viabilidad de un proyecto de esta naturaleza. La comprensión y superación de estas restricciones son esenciales para aprovechar el potencial geotérmico del país y contribuir al desarrollo sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la diversificación de la matriz energética colombiana. A través de este análisis, buscamos proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas en el camino hacia un futuro energético más limpio y sostenible en Colombia.

4.1. Restricciones ambientales

Las restricciones ambientales en el contexto de la implementación de una central geotérmica en Colombia son fundamentales para garantizar la sostenibilidad y la preservación de los recursos naturales. En primer lugar, existe una preocupación legítima acerca de la posible saturación del recurso geotérmico. La explotación inadecuada o la extracción excesiva de fluidos geotérmicos podrían agotar este recurso natural, lo que a largo plazo podría afectar la viabilidad de la central, según el “Estudio



Ilustración 7. Central geotérmica en explotación. Generado por IA.

De Factibilidad Para La Instalación De Una Central Geotérmica En Chile” de Sergio Lagos expresa que en algunos casos se deben intervenir en perforaciones adicionales para reemplazar los otros ante su pérdida de potencial. Por otra parte, la obtención de licencias ambientales es un requisito crucial en el proceso. Estas licencias establecen los límites y protocolos para el manejo de los recursos geotérmicos y la protección del entorno. También, se deben considerar los riesgos de contaminación de las aguas cercanas. La interacción entre los fluidos geotérmicos y las aguas subterráneas circundantes debe ser monitoreada y gestionada adecuadamente para prevenir la contaminación. Asimismo, la emisión de gases, como el dióxido de azufre y el vapor de agua, durante la generación de energía geotérmica debe ser controlada y minimizada para evitar impactos ambientales negativos. Por último, la responsabilidad sobre las perforaciones y su posterior desuso debe ser un aspecto central. La clausura adecuada de los pozos geotérmicos al final de su vida útil es esencial para evitar riesgos de fugas y contaminación del subsuelo. Todas estas restricciones ambientales requieren una gestión cuidadosa y el cumplimiento riguroso de las regulaciones para garantizar que la implementación de la central geotérmica sea ambientalmente sostenible.

4.2. Restricciones económicas

Las restricciones económicas plantean desafíos significativos en el camino hacia la implementación de una central geotérmica en Colombia. En primer lugar, se encuentra el poco interés de inversión por parte de los inversionistas, en gran medida debido a

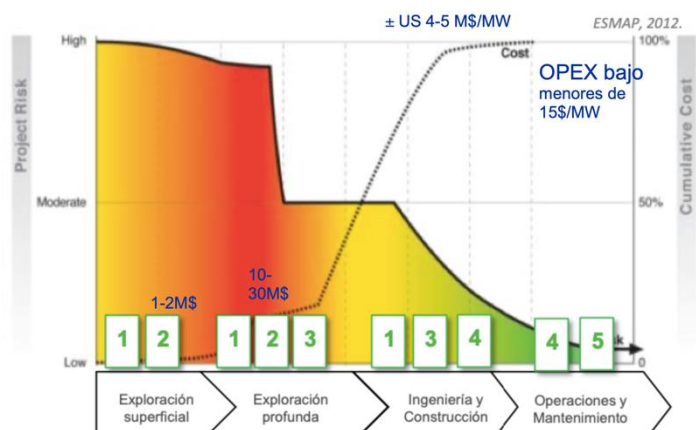


Ilustración 8. Costos para el desarrollo de una central geotérmica.

la necesidad de considerar la rentabilidad a largo plazo. La inversión en proyectos geotérmicos a menudo implica un horizonte temporal más extenso para obtener ganancias en comparación con fuentes de energía más convencionales. Además, los costos asociados con la adquisición de maquinaria, instalaciones y recursos técnicos especializados son considerables. La perforación de pozos geotérmicos, la instalación de equipos de generación y la infraestructura necesaria representan una inversión inicial significativa. Además, el contexto político y las transformaciones en la economía pueden influir en la viabilidad de proyectos de energías renovables. Cambios en las políticas gubernamentales, como incentivos fiscales o subsidios a energías limpias, pueden ser determinantes en la decisión de inversión. La estabilidad económica y las perspectivas a largo plazo para el mercado de energía renovable también afectan la disposición de los inversionistas a financiar proyectos geotérmicos. Superar estas restricciones económicas requiere una planificación financiera sólida, la identificación de fuentes de financiamiento adecuadas y una evaluación cuidadosa de los riesgos y beneficios asociados con la inversión en energía geotérmica en un entorno cambiante.

4.3. Restricciones legales

Las restricciones legales representan un componente crítico en la implementación de una central geotérmica en Colombia. En primer lugar, la solicitud de permisos para la exploración de la zona geotérmica es un proceso fundamental. Obtener la autorización necesaria para llevar a cabo estudios de exploración y perforación de pozos geotérmicos es un requisito inicial que debe

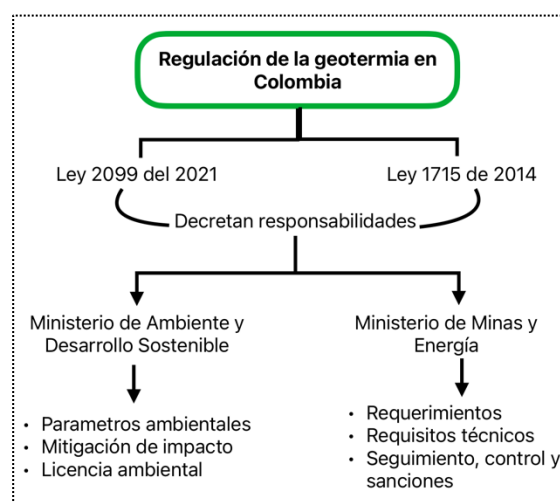


Ilustración 9. Regulaciones en Colombia y responsabilidades de ministerios

cumplirse. Además, la solicitud de licencias ambientales es un paso esencial para garantizar que el proyecto cumpla con las regulaciones y normativas ambientales vigentes. La evaluación de impacto ambiental y la mitigación de riesgos ambientales son aspectos clave de este proceso. Además, contar con las garantías financieras adecuadas para respaldar el proyecto es un requisito legal importante. Estas garantías son esenciales para cubrir los costos de clausura y desmantelamiento del proyecto en caso de incumplimiento. Finalmente, el cumplimiento de las normas y regulaciones locales, regionales y nacionales es una restricción ineludible. Desde las leyes de uso del suelo hasta las regulaciones de seguridad y protección ambiental, el proyecto de energía geotérmica debe ajustarse rigurosamente a las disposiciones legales. Superar estas restricciones legales requiere una comprensión profunda de la legislación vigente, la colaboración con las autoridades pertinentes y el establecimiento de procedimientos y políticas sólidas para garantizar el cumplimiento en todas las etapas del proyecto.

4.4. Restricciones socioculturales

Las restricciones socioculturales desempeñan un papel significativo en el proceso de implementación de una central geotérmica en Colombia. Una de las principales restricciones en este sentido es la percepción de la geotermia como una fuente de energía relativamente nueva y desconocida para muchos. Esta falta de familiaridad puede generar resistencia tanto en la adaptación de la energía geotérmica a la red eléctrica como en la aceptación por parte de los consumidores. La necesidad de educar a la comunidad y a los actores clave sobre los beneficios y la viabilidad de esta fuente de energía sostenible es crucial. Superar estas restricciones socioculturales implica una comunicación efectiva, la divulgación de información precisa y la promoción de la conciencia pública sobre la importancia de la geotermia como una alternativa viable y limpia en el panorama energético. Además, la participación de las comunidades locales

en el proceso de toma de decisiones y la consideración de sus intereses y preocupaciones son esenciales para mitigar las restricciones socioculturales y avanzar hacia la implementación exitosa de la central geotérmica.

5. Metodología para la Selección y Desarrollo de la Solución

5.1. Costo de Generación

Los costos de generación de energía geotérmica pueden variar significativamente según una variedad de factores, incluido el tipo de proyecto, la escala de la planta geotérmica y la ubicación geográfica. Sin embargo, una vez que la planta está en funcionamiento, la energía geotérmica tiende a ser una fuente de energía renovable relativamente económica. Los costos de la generación de energía geotérmica se ven afectados por los siguientes factores:

- **Recursos geotérmicos:** la disponibilidad de los recursos geotérmicos es crucial. Las áreas que tienen un flujo de calor geotérmico más grande y temperaturas más altas suelen ser más adecuadas para la generación de energía geotérmica. La proximidad a fuentes geotérmicas de alta calidad influye porque la perforación de pozos geotérmicos puede ser costosa.
- **Escala del proyecto:** Los costos de generación de energía geotérmica varían según el tamaño de la planta. Las plantas geotérmicas más grandes a menudo tienen costos por kilovatio hora (kWh) más bajos en comparación con las plantas más pequeñas debido a las economías de escala.
- **Tipo de planta:** Existen varios tipos de plantas geotérmicas, incluidos los sistemas de calor directo, los ciclos binarios y los ciclos de vapor. Cada planta tiene sus propios costos y eficiencias. Por ejemplo, la construcción de plantas de ciclo de vapor suele ser más costosa, pero también puede ser más eficiente.

- **Costos de inversión iniciales:** la perforación de pozos geotérmicos, la construcción de instalaciones y la instalación de infraestructura eléctrica inicial pueden ser costosas. Estos gastos iniciales pueden tener un impacto significativo en el costo de la generación de energía geotérmica.
- **Incentivos y políticas:** el costo y la implementación de proyectos de Energías Renovables pueden variar dependiendo el país en donde se vayan a desarrollar, ya que en cada uno se encuentra una política diferente que impulsa la implementación de proyectos Renovables. Este puede ser un factor importante en la toma de decisión para implementar un proyecto de geotermia, ya que, además, la ejecución de este tipo de proyectos comprende un costo de inversión muy elevado frente otro tipo de Energías Renovables.
- **Tecnología y experiencia:** La experiencia y la tecnología utilizadas en la construcción y operación de plantas geotérmicas pueden afectar los costos. A lo largo del tiempo, la innovación tecnológica puede aumentar la eficiencia y reducir los costos.

La Comisión Europea (CE) presenta los siguientes costos de instalación para plantas tipo flash y para las binarias hasta el año 2020 como se representa en la siguiente imagen.

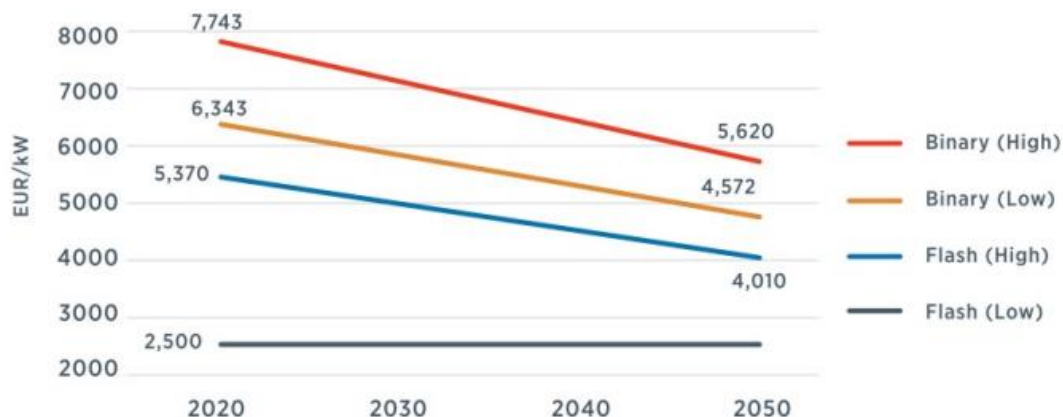


Ilustración 10 Pronóstico de Gastos para una Planta de Energía Geotérmica en la Unión Europea

5.2. Análisis Económico

5.2.1. Consideraciones Técnicas

La implementación de una central geotérmica es un proceso altamente técnico y especializado que involucra la conversión de la energía térmica contenida en el subsuelo en electricidad. Comienza con una evaluación exhaustiva de los recursos geotérmicos en la ubicación seleccionada, lo que implica medir la temperatura y el flujo de calor geotérmico en el área y evaluar la capacidad y la calidad del yacimiento geotérmico subterráneo. Luego, se procede al diseño de pozos geotérmicos, determinando su ubicación, profundidad, diámetro y revestimiento para una extracción eficiente de vapor o agua caliente. La elección del tipo de planta geotérmica, la tecnología de conversión de energía y el ciclo termodinámico son consideraciones técnicas críticas que deben abordarse con precisión. Una vez que la planta está en funcionamiento, se realiza un monitoreo continuo y se implementa un plan de mantenimiento a largo plazo para garantizar una operación segura y eficiente. La implementación de una central geotérmica requiere una planificación cuidadosa, conocimientos técnicos especializados y el cumplimiento de regulaciones y permisos para llevar a cabo con éxito la conversión de calor geotérmico en electricidad renovable y sostenible.

Estas son algunas precisiones:

- **Evaluación de recursos geotérmicos:** La evaluación de recursos geotérmicos es un proceso fundamental que se lleva a cabo para determinar la cantidad y la calidad de la energía geotérmica disponible en una determinada ubicación. Esta evaluación es crucial para la planificación y el desarrollo de proyectos geotérmicos. Esto implica la recopilación de datos geológicos, como la estructura de la corteza terrestre, la presencia de fallas, fracturas y depósitos geotérmicos. Las técnicas geofísicas, como la sísmica, la magnetometría y la gravimetría, se

utilizan para obtener información sobre la geología subsuperficial y la distribución del calor geotérmico.

- **Diseño de pozos:** El diseño de pozos geotérmicos es una parte fundamental en el desarrollo de proyectos de energía geotérmica. Consiste en la planificación y especificación detallada de la perforación y construcción de pozos que permitirán la extracción de los fluidos geotérmicos necesarios para la generación de energía. El primer paso en el diseño de pozos geotérmicos implica la elección del tipo de pozo que se utilizará. Los tipos de pozos geotérmicos comunes incluyen pozos de producción, pozos de inyección y pozos de observación. Los pozos de producción extraen los fluidos geotérmicos calientes, los pozos de inyección reinyectan los fluidos después de su uso y los pozos de observación se utilizan para monitorear la temperatura y la presión en el yacimiento geotérmico. El segundo paso es diseñar los pozos con las especificaciones adecuadas, incluyendo profundidad, diámetro y revestimiento, para garantizar una extracción eficiente de vapor o agua caliente.

Para garantizar la sostenibilidad a largo plazo se debe generar la gestión y prevención del recurso geotérmico para evitar llegar a su punto de saturación, evitando generar sobrecostos en la exploración, perforación e implementación del sistema en nuevos puntos. La metodología a implementar iniciaría con un monitoreo constante de los recursos evaluando la temperatura y la presión proporcionando datos en tiempo real del estado de recurso geotérmico, estudiaría la capacidad del recurso con estudios geológicos y geotécnicos para comprender su capacidad además utilizar modelos y simulaciones para prever el comportamiento a lo largo del tiempo y por último establecería umbrales de uso para evitar el punto no retorno en donde llegar a recuperar el recurso geotérmico podría tardar siglos (Energías, 2022).

6. System Advisor Model (SAM)

El System Advisor Model (SAM) es un modelo de software tecnológico y económico gratuito que ayuda a la toma de decisiones para personas en la industria de energía renovable. SAM puede modelar muchos tipos de sistemas de energía renovable, incluyendo sistemas fotovoltaicos, almacenamiento de baterías, sistemas de energía solar concentrada, energía eólica, energía marina, calefacción de procesos industriales, generación de energía geotérmica, combustión de biomasa para generación de energía, y sistemas fotovoltaicos de alta concentración. SAM también incluye modelos financieros para proyectos residenciales y comerciales, proyectos de acuerdo de compra de energía, y propiedad de terceros. SAM es un modelo de rendimiento y financiero diseñado para estimar el costo de la energía para proyectos de energía conectados a la red basados en costos de instalación y operación y diseño del sistema para facilitar la toma de decisiones para personas involucradas en la industria de energía renovable ¹.

Para el modelo Geotermal se usa para calcular los costos totales de instalación y operación para su aplicación en el modelo financiero, por ende, usan un modelo representado a continuación:

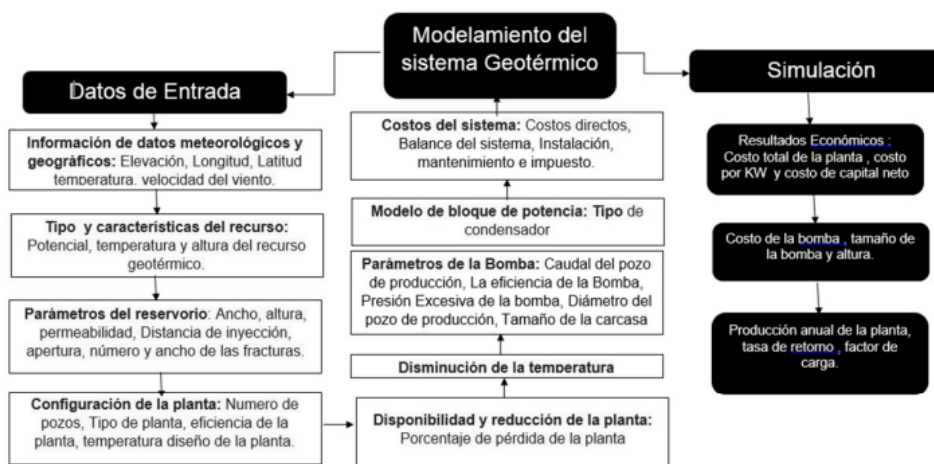


Ilustración 11 Modelo usado por el software SAM para simular el sistema geotérmico. Recuperado de "Dimensionamiento del Modelo de la Planta GT para el Volcán Cerro Machín usando SAM"

Sin embargo, SAM necesita como entrada datos específicos sobre el recurso geotérmico, tales como la temperatura, el flujo y la profundidad del fluido. Estos datos no siempre están disponibles o son de difícil acceso para los usuarios. Por lo tanto, se propone que en el siguiente proyecto se busquen fuentes de información confiables y actualizadas sobre el recurso geotérmico que se necesita usar en la aplicación SAM. Esto permitirá realizar análisis más precisos y realistas sobre el potencial de la energía geotérmica en diferentes regiones del país.

7. Resumen

Servicio Geológico Colombiano. (2019). Geotermia en Colombia. Recuperado 27 de noviembre de 2023, de:

<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>

Tester, J.W. et al. (2006). "The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century." Massachusetts Institute of Technology.

DiPippo, R. (2012). "Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact" (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Projected Costs of Generating Electricity 2015. (s/f). IEA. Recuperado el 5 de noviembre de 2023, de <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2015>

Dipippo, Ronald. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, Elsevier Science & Technology, 2012. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaean-ebooks/detail.action?docID=896326>.

OECD. *Enabling Conditions for Bioenergy Finance and Investment in Colombia*, Organization for Economic Cooperation & Development, 2022. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaean-ebooks/detail.action?docID=30175328>.

Thermodynamics of Geothermal Fluids, edited by Andri Stefánsson, et al., Walter de Gruyter GmbH, 2018. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaean-ebooks/detail.action?docID=5601207>.

Geothermal Energy: The Resource Under our Feet: the Resource under our Feet, edited by Charles T. Malloy, Nova Science Publishers, Incorporated, 2010. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaean-ebooks/detail.action?docID=3019800>.

Renewable Energy Engineering: Solar, Wind, Biomass, Hydrogen and Geothermal Energy Systems,
edited by Emmanuel D. Rogdakis, and Irene P. Koronaki, Bentham Science Publishers, 2018. *ProQuest Ebook
Central*, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaean-ebooks/detail.action?docID=5614087>.