

Revisión de literatura de Proyectos Energéticos basados en Energía Geotérmica

Daniel Santiago Enriquez Pardo

Juan Sebastian Montilla Achicanoy

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

Revisión de literatura de Proyectos Energéticos basados en Energía Geotérmica

Daniel Santiago Enriquez Pardo

Juan Sebastian Montilla Achicanoy

Informe final de Trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería
Electrónica para optar por el título de Ingeniero Electrónico.

Asesor

Msc. Francisco Eraso Checa

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG para optar al título de Ingeniero Electrónico

Francisco Eraso Checa

Asesor

.....

Jurado

.....

Jurado

Página de nota de exclusión de responsabilidad intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de su autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Dedicatoria

Este trabajo de grado no solo representa el esfuerzo y dedicación que he invertido en los últimos años, sino también el apoyo invaluable que he recibido de las personas que más significan para mí.

Quiero comenzar agradeciendo a Dios, quien ha sido mi mayor apoyo a lo largo de este viaje. Gracias por las virtudes y bendiciones que me has concedido; sin ellas, no habría podido alcanzar mi sueño de convertirme en ingeniero electrónico. Tu guía y amor han iluminado cada paso de este camino y me han dado la fuerza para seguir adelante. Con todo mi corazón, dedico este logro a Ti.

También quiero dedicar este éxito a mis padres, quienes han sido mis guías, mentores y pilares inquebrantables. Su amor incondicional, sacrificios y fe en mí han sido la base sólida sobre la que he construido mi camino hacia la ingeniería. Cada consejo, cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo han sido cruciales para superar los desafíos que enfrenté. Gracias por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles.

Mi gratitud también va hacia mi familia, cuyos valores, amor y apoyo han sido mi fuente de fortaleza. Cada uno de ustedes ha jugado un rol importante en este viaje, ofreciendo palabras de aliento, apoyo emocional y, en ocasiones, el empujón necesario para seguir adelante. Gracias por su paciencia, comprensión y por estar siempre allí cuando más los he necesitado.

A mi novia, no hay palabras suficientes para expresar mi agradecimiento. Tu amor y apoyo constante han sido mi refugio en los momentos más difíciles. Tu comprensión y paciencia han hecho que cada desafío sea más llevadero, y tu alegría y entusiasmo han sido un faro de luz en los días más grises. Gracias por ser mi compañera en esta aventura y por compartir conmigo cada paso de este camino.

A la Universidad CESMAG, agradezco profundamente el conocimiento y las herramientas que me proporcionaron. Esta institución no solo me enseñó los principios técnicos necesarios para mi profesión, sino que también me brindó una formación integral que me ha ayudado a crecer tanto personal como profesionalmente. Cada clase, cada proyecto y cada experiencia en esta universidad han sido piezas clave en el rompecabezas que hoy me permite llamarme ingeniero.

Finalmente, a mis amigos, quienes han sido mi compañía y mi fuente de inspiración a lo largo de este proceso. Gracias por las risas compartidas y por el apoyo que me brindaron en cada etapa de esta travesía. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera significativa a que este logro sea posible.

Este trabajo de grado es el resultado de un esfuerzo colectivo, y estoy profundamente agradecido por tener a todos ustedes en mi vida. Sin su apoyo, este sueño no habría sido posible. Gracias por ser parte de mi viaje y por ayudarme a alcanzar esta meta.

Juan Sebastian Montilla Achicanoy.

Dedicatoria

A mis queridos padres, cuya dedicación, amor y sacrificio han sido las piedras angulares de mi vida. A ustedes, que con su ejemplo me enseñaron el verdadero significado de la perseverancia, la honestidad y el trabajo duro. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba de mis propias capacidades. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, que siempre me han acompañado con palabras de aliento, sabios consejos y un amor incondicional que trasciende cualquier barrera.

A mi familia, a mis hermanos, por ser mis compañeros en este viaje, por cada risa compartida y por las interminables conversaciones que me ayudaron a mantener la calma en los momentos de tensión. A mis abuelos, tíos, tías, y demás seres queridos, por sus oraciones, su apoyo moral y por ser fuente de inspiración. Cada uno de ustedes ha dejado una huella indeleble en este proceso, y por eso les dedico este esfuerzo con todo mi corazón.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado en cada etapa de esta travesía. A aquellos que me brindaron su compañía en los momentos de estudio y también en los de descanso. Gracias por las charlas que disiparon mis preocupaciones, por las risas que aligeraron mis días, y por el apoyo que siempre fue sincero. Ustedes han sido una parte vital de este logro, y su amistad es un tesoro que valoro profundamente.

A mi asesor de tesis cuyo conocimiento, paciencia y dedicación han sido cruciales en la culminación de este trabajo. Sus orientaciones y críticas constructivas me han permitido crecer como investigador y como persona. Agradezco sinceramente su tiempo, su esfuerzo y su compromiso con mi formación académica. Este trabajo es también reflejo de su profesionalismo y de su pasión por la enseñanza.

Finalmente, a la Universidad por haberme brindado un espacio en el que pude desarrollar mis capacidades y conocimientos. A esta institución que me ha permitido crecer académica y personalmente, y a todos los profesores que contribuyeron a mi formación, les extiendo mi más profundo agradecimiento. La educación recibida aquí ha sido un motor que impulsará mis futuros proyectos, y siempre llevaré con orgullo el nombre de esta universidad.

Daniel Santiago Enriquez Pardo.

Contenido

Introducción	15
1. El Problema de Investigación	17
1.1 Objeto o tema de investigación	17
1.2 Líneas de investigación: Potencia y energía.	17
1.3 Sub-línea de investigación: Energías alternativas.	17
1.4 Descripción del problema.....	18
1.5 Formulación del problema	19
1.6 Objetivos	20
1.6.1 Objetivo general	20
1.6.2 Objetivos específicos.....	20
1.7 Justificación.....	20
1.8 Delimitación del problema.....	21
2. Tópicos del Marco Teórico.....	23
2.1 Antecedentes	23
2.1.1 Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático.	23
2.1.2 Modelos de composición corporal basados en antropometría: revisión sistemática de literatura.....	24
2.1.3 Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia.	25

2.1.4	Evaluación de factibilidad técnica para una planta geotérmica en paipa-iza, Boyacá.	27
2.1.5	Hacia la sustentabilidad social de proyectos geotérmicos en México.....	28
2.1.6	Guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos.....	29
2.1.7	Geothermic Characteristics and trends in geothermal development and use, 1995 to 2020	30
2.2	Enunciados de los supuestos teóricos.....	32
2.2.1	Panorama energético mundial en geotermia.....	32
2.2.2	Sistemas geotermiales	34
2.2.3	Energía geotérmica.....	36
2.2.4	Proyecto de energía geotérmica profunda	38
2.2.5	Eficiencia en las plantas de generación geotérmica	39
2.2.6	Contexto general de la energía geotérmica	43
2.2.7	Energía geotérmica: una alternativa para la matriz eléctrica a nivel mundial	44
3.	Metodología	47
3.1	Tipo de investigación	47
3.2	Diseño.....	47
3.2.1	Planificación	48
3.2.2	Búsqueda	48
3.2.3	Selección de artículos	48

	11
3.2.4 Evaluación	49
3.2.5 Extracción y síntesis	49
3.3 Universo y muestra.....	49
3.4 Técnicas en la relación de información.....	49
3.5 Instrumento de recolección	50
4. Resultados	51
4.1 Selección de artículos mediante revisión de literatura	51
4.1.1 Planificación	51
4.1.2 Búsqueda	52
4.1.3 Selección de artículos	52
4.1.4 Evaluación de resultados	54
4.2 Análisis documental de la Revisión Sistemática de Literatura	57
4.2.1 Técnicas de exploración	57
4.2.2 Costo de los equipos de excavación	64
4.2.3 Capacidad de generación.....	67
4.2.4 Costo de la energía	73
4.2.5 Costo de la inversión	76
4.2.6 La eficiencia que tienen este tipo de proyectos	78
5. Discusión de resultados.....	83
Conclusiones	87

Recomendaciones..... 89

Referencias..... 90

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de Colombia lugares de mayor capacidad de calor concentrado [14]	32
Figura 2 Ciclo del agua para evaporación a través de las capas de la terráqueas [15]	35
Figura 3 Proceso de generación eléctrica por geotérmica [18]	37
Figura 4 Planta tipo Flash [10].....	39
Figura 5 Planta tipo Binaria [10].....	40
Figura 6 Cinturón de fuego en mapamundi [18].....	44
Figura 7 Localización de zonas volcánicas, [64]	45
Figura 8 Generación de Electricidad a través de Geotermia 1995-2020, [54].....	46
Figura 9 Esquemático PRISMA de la RSL.....	55
Figura 10 Comparación Geotérmica con otras fuentes de Generación [23]	71
Figura 11. Evolución temporal del flujo de calor (a), generación térmica y eléctrica, y eficiencia de conversión (b), [29].	82

Lista de Tablas

Tabla 1 Resumen del archivo de recolección de los metadatos (Excel)	56
Tabla 2 Técnicas de exploración	57
Tabla 3 Costos de equipos de excavación	64
Tabla 4 Capacidad de Generación	68
Tabla 5 Generación Instalada 1995-2020 [54]	71
Tabla 6 Costo de la generación eléctrica	73
Tabla 7. Costos de generación por kWh	74
Tabla 8. Costos de generación eléctrica Geotérmica de 2010 a 2050 [30]	76
Tabla 9 Costo de inversión	76
Tabla 10. Costo de inversión	78
Tabla 11 Eficiencia Para Generación Geotérmica	79
Tabla 12. Comparación de costos de producción de la energía renovable [34]	85

Introducción

La presente monografía se desarrolla mediante un proceso de Revisión Sistemática de Literatura (RSL), centrándose en la exploración de artículos de revista publicados en bases de datos especializadas como Scopus e IEEE Xplore. Se sigue la metodología establecida por la Universidad de Keele [1], [2], que incluye la definición de criterios de inclusión y exclusión, la formulación de una estrategia de búsqueda bibliográfica, la extracción de datos, la selección y especificación de artículos según criterios predefinidos, así como la evaluación de la calidad de los resultados.

Este enfoque sistemático permite identificar documentos que abordan preguntas de investigación específicas relacionadas con proyectos de generación eléctrica mediante energía geotérmica ya implementados. El análisis de fuentes secundarias revela patrones exitosos en la implementación de energía geotérmica, ofreciendo datos valiosos para su potencial aplicación en Colombia, especialmente en Nariño, una región volcánica [3].

Es crucial considerar el potencial geotérmico para la generación eléctrica, aunque se destaca la necesidad de tener precaución al aplicar herramientas de interpretación geoquímicas. Estas herramientas pueden influir en la composición de la corteza terrestre a través de fluidos geotérmicos, y los elementos geoquímicos pueden afectar la temperatura, actuando como aislantes o conductores de calor [4].

La estructura de la monografía se organiza en capítulos: el primero aborda el problema de estudio, el segundo se centra en los elementos teóricos sin incluir la definición de variables ni la formulación de hipótesis debido a la naturaleza del estudio, el tercero describe detalladamente la metodología basada en el enfoque de Keele, y finalmente, se enfoca en la búsqueda de resultados detallando los relevantes que respondan a las preguntas de investigación, estos son plasmados en

el cuarto capítulo del presente documento respondiendo las preguntas de investigación, estas están relacionadas con temas de búsqueda de información como son cuales son las técnicas de exploración, cual es el costo de la perforación, la capacidad de generación, el costo de la energía, el costos de la inversión y la eficiencia de este tipo de proyectos.

1. El Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Artículos científicos relacionados con proyecto de generación geotérmica.

1.2 Líneas de investigación: Potencia y energía.

El área de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas [5].

1.3 Sub-línea de investigación: Energías alternativas.

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quemado de combustibles fósiles o, en el caso de Colombia, la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia de las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor [5].

1.4 Descripción del problema

En la actualidad, algunos de los métodos tradicionales de generación eléctrica tienen un impacto negativo en el medio ambiente debido a que muchos se basan en la quema de combustibles fósiles. Este proceso libera dióxido de carbono (CO₂) y otros gases que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. Además, los combustibles fósiles son recursos no renovables, lo que significa que su disponibilidad es limitada y depende de nuevas exploraciones. Esto pone en riesgo la sostenibilidad a largo plazo de la generación eléctrica basada en estos combustibles.

Dado el crecimiento constante del consumo energético mundial, es crucial encontrar alternativas de generación que sean sostenibles y renovables. La energía geotérmica es una opción prometedora pero aún poco explorada. Sin embargo, ya se ha implementado con éxito en países como Chile, Islandia, Italia, Estados Unidos y Filipinas. Esta fuente de energía aprovecha el calor interno de la Tierra para evaporar agua subterránea [6], que luego se transporta a través de tuberías hacia un generador eléctrico. La energía generada se distribuye a través de transformadores a redes eléctricas que llegan a ciudades, pueblos y áreas remotas.

Colombia, especialmente la región de Nariño, se encuentra en el cinturón de fuego [4], una zona volcánica con un alto potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica. A pesar de este potencial, el sistema de generación eléctrica en Colombia actualmente no incluye fuentes geotérmicas. El trabajo realizado hasta ahora ha sido principalmente teórico y orientado al diseño, y ha identificado un alto potencial para esta fuente de energía [4]. Los estudios realizados desde los años 80 y la continua investigación del Servicio Geológico Nacional han dado lugar a un inventario de manifestaciones termales y a un mapa geotérmico con

interpretaciones de temperatura a 3 km de profundidad en todo el país [4]. Sin embargo, aún faltan datos prácticos sobre la capacidad de generación y el uso de sistemas geotérmicos en el país.

Por esta razón, es necesario desarrollar un análisis de estudios globales sobre esta fuente de energía, publicados en revistas científicas confiables, que sirvan como referencia conceptual. En particular, se desea conocer los resultados obtenidos por quienes ya han implementado la energía geotérmica, para obtener una mejor comprensión de su viabilidad y aplicaciones prácticas, específicamente se desea conocer:

- ¿Cuáles son las técnicas de exploración?
- ¿Cuál es el costo de la perforación?
- ¿Cuál es la capacidad de generación?
- ¿Cuál es el costo de la energía?
- ¿Cuál es el costo de la inversión?
- ¿Cuál es la eficiencia que tiene este tipo de proyectos?

1.5 Formulación del problema

¿Cuál es el estado de la información científica publicada en relación a la implementación de sistemas de generación eléctrica a partir de geotermia, a nivel mundial?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Establecer el estado de la información científica publicada en relación a la implementación de sistemas de generación eléctrica a partir de geotermia.

1.6.2 Objetivos específicos

- Determinar los documentos científicos relacionados con implementación en generación eléctrica mediante energía geotérmica.
- Analizar sistemáticamente los documentos seleccionados de acuerdo a las preguntas de investigación.
- Sintetizar la información analizada de acuerdo a las preguntas de investigación.

1.7 Justificación

Esta investigación se realiza como guía para el desarrollo de proyectos de energía geotérmica, tomando en cuenta las experiencias de diferentes proyectos implementados en varios países. Con la información recolectada de los artículos se obtienen elementos que contienen el diseño e implementación de sistemas geotérmicos. Se consideran los aportes de los artículos relacionados con los criterios de investigación de este documento que servirán como base para futuros proyectos.

La Ley 1715 de 2014 busca fomentar y promover activamente la exploración, investigación y desarrollo de proyectos energéticos de fuentes renovables, incluida la energía geotérmica. Con esta ley, el gobierno respalda la búsqueda de estrategias alternativas de fuentes de generación renovables y sostenibles, aprovechando las oportunidades de utilizar el suelo rico

en energía geotérmica de la región, lo que sirve como un suministro constante de producción de energía eléctrica. Para Colombia, la presencia de varios volcanes en sus cordilleras es beneficiosa, ya que contribuyen a la capacidad del subsuelo para almacenar calor y ser utilizado en la generación de electricidad [7].

La energía geotérmica es una excelente fuente de generación de energía que utiliza el calor natural de la tierra. Se caracteriza por su capacidad de generar electricidad de manera limpia y con menores emisiones de gases de efecto invernadero, a diferencia de los combustibles fósiles, cuyo uso acelera significativamente el cambio climático, debido a su alto contenido de carbono. La energía geotérmica se posiciona como una energía alternativa más verde y sostenible a largo plazo [7].

La demanda de energía eléctrica entre 2021 y 2022 estuvo entre los entre 196 y 234 GWh/día, sin incluir a los grandes consumidores, la proyección a 2037 podría tener un crecimiento promedio anual de 1,65% a 2,99% [8]. Dado el promedio de incremento anual, se deben buscar alternativas de sostenibilidad energética para el país para ser integradas al SIN (Sistema Interconectado Nacional), una de estas es la geotermia por su potencial capacidad para ser aprovechada de manera sostenible.

Finalmente, el proyecto permitirá conocer el estado actual de la tecnología enriqueciendo los cursos institucionales relacionados con energía renovable, proporcionando datos reales, y claridad en los procedimientos de implementación.

1.8 Delimitación del problema

Se realiza el análisis de documentos, a nivel mundial, utilizando el método de revisión sistemática de literatura de la Universidad de Keele [1], [2], enfocándose en las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las técnicas de exploración?
- ¿Cuál es el costo de la perforación?
- ¿Cuál es la capacidad de generación?
- ¿Cuál es el costo de la energía?
- ¿Cuál es el costo de la inversión?
- ¿Cuál es la eficiencia que tiene este tipo de proyectos?

2. Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático.

En los últimos tiempos, las revisiones sistemáticas de literatura han emergido como una metodología de investigación crucial en el campo de la ingeniería. Esta metodología se distingue por su enfoque en garantizar un diseño y ejecución apropiados, así como una estrategia de búsqueda efectiva. En este contexto, se ha reconocido la necesidad de desarrollar enfoques que permitan extraer información de manera óptima de la amplia gama de literatura científica disponible.

El objetivo primordial de este antecedente [2] radica en el análisis detallado de la estructura metodológica de las revisiones sistemáticas de literatura realizadas en el ámbito de la ingeniería, con especial atención a la evolución observada en las diversas etapas consideradas en dicha revisión. Para alcanzar este objetivo, se llevó a cabo un estudio de mapeo sistemático, el cual se basó en la recopilación y análisis de publicaciones académicas de los últimos ocho años, obtenidas de las bases de datos Scopus y Web of Science (Wos).

Los resultados obtenidos de este estudio revelan la existencia de un total de 13 revisiones sistemáticas de literatura que se centran predominantemente en áreas temáticas relacionadas con la calidad y el desarrollo en ingeniería. Sin embargo, uno de los hallazgos más significativos es que, a pesar de la similitud en las metodologías utilizadas por estas revisiones, solo un número reducido de ellas considera una agregación efectiva de evidencia proveniente de los estudios incluidos.

En términos de conclusiones principales, se observa una clara preferencia por parte de los investigadores hacia la realización de revisiones sistemáticas en áreas específicas y bien delimitadas dentro de la ingeniería de software, como es el caso del área de desarrollo y calidad.

Además, se evidencia una tendencia hacia la realización de investigaciones menos exhaustivas, como los estudios de mapeo sistemático, en lugar de las revisiones sistemáticas más tradicionales y completas. Estos hallazgos ofrecen una perspectiva valiosa sobre las prácticas y preferencias actuales en el ámbito de la investigación en ingeniería.

2.1.2 Modelos de composición corporal basados en antropometría: revisión sistemática de literatura.

En el contexto de la determinación precisa de la composición corporal, se ha observado la necesidad de abordar los desafíos asociados con los métodos de medición que requieren equipos especializados y habilidades técnicas específicas. Esta limitación ha llevado a la búsqueda de alternativas, entre las cuales se destacan los modelos matemáticos desarrollados por diversos autores para calcular la composición corporal a partir de medidas antropométricas.

Con el propósito de analizar en profundidad estos modelos matemáticos y su aplicación en la determinación de variables de composición corporal, se planteó el objetivo de realizar una revisión exhaustiva de la literatura disponible en el campo. Para llevar a cabo este estudio, se recurrió a la metodología de revisión sistemática de literatura (RSL) desarrollada por la Universidad de Keele.

El enfoque metodológico de esta revisión se orientó hacia la identificación y síntesis de la evidencia existente en revistas especializadas en áreas pertinentes como Medicina, Enfermería, Bioquímica, Biología, Salud, Farmacología, Inmunología, Ingeniería y Matemáticas. Tras un

proceso riguroso de selección y análisis, se redujo una amplia cantidad de artículos a una muestra representativa de 30 trabajos que cumplían con los criterios establecidos.

Los resultados obtenidos de esta revisión revelaron un enfoque predominante en la predicción de variables asociadas con la masa grasa corporal. Además, se observaron variaciones en la evaluación de la precisión y validez de los modelos, dependiendo de las técnicas de comparación utilizadas y los segmentos corporales analizados. Estas conclusiones proporcionan una base sólida para comprender la eficacia y aplicabilidad de los modelos matemáticos en la estimación de la composición corporal, así como para identificar áreas para futuras investigaciones en este campo [9].

2.1.3 Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia.

Para el análisis integral sobre el potencial y las iniciativas en torno a la energía geotérmica en Colombia. Donde el país es abundantemente rico en recursos energéticos, Colombia ha dependido históricamente de la hidroelectricidad, que ha cubierto aproximadamente el 80% de su generación eléctrica en años recientes, mientras que el restante 20% proviene de fuentes como el gas natural y el carbón. Sin embargo, la creciente amenaza del cambio climático, con efectos notorios en ecosistemas frágiles como los glaciares y nevados, ha hecho evidente la necesidad de diversificar la generación eléctrica del país [10].

La energía geotérmica o como el calor generado en el interior de la Tierra y almacenado en áreas con actividad volcánica, se presenta como una solución estratégica para esta diversificación. Este recurso puede ser aprovechado en zonas cercanas a volcanes, donde las rocas subterráneas alcanzan temperaturas elevadas, calentando el agua que se infiltra en el subsuelo. Este proceso da lugar a múltiples aplicaciones de la geotermia, desde la generación de energía eléctrica hasta el uso en baños medicinales, calefacción de espacios, turismo, agricultura y diversas

actividades industriales. La versatilidad y su potencial para contribuir a una generación eléctrica más diversificada y sostenible en Colombia.

En la evaluación del estado actual de la geotermia en el mundo y en Colombia, el artículo menciona las capacidades instaladas y las proyecciones de crecimiento en este sector. A nivel global, la geotermia ha avanzado considerablemente, pero en Colombia su desarrollo está aún en etapas tempranas. Los esfuerzos de instituciones como ISAGEN S.A. E.S.P. han permitido avanzar en estudios preliminares y en la identificación de áreas geotérmicas de interés, como el Macizo Volcánico del Ruiz, una de las zonas con mayor potencial geotérmico del país.

Se debe seguir un proyecto geotérmico para asegurar su viabilidad y sostenibilidad. Estas etapas incluyen el reconocimiento, la prefactibilidad, la factibilidad, la construcción y la operación. Cada una de ellas implica estudios geológicos y geofísicos detallados, así como la evaluación de impactos ambientales para garantizar que los proyectos sean tanto técnica como ecológicamente responsables.

El BID, comprometido con el desarrollo de fuentes de energía renovable y la mitigación del cambio climático, ha sido un aliado clave en el fomento del uso eficiente de recursos energéticos no convencionales como la geotermia en Colombia. A través del financiamiento de entidades como el Fondo de Consultoría Japonés (JCF) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), el BID ha proporcionado apoyo financiero y técnico para proyectos geotérmicos, como el desarrollado por ISAGEN, que han contado con la colaboración de instituciones académicas y organismos internacionales. Estas iniciativas buscan no solo mejorar la generación de energía en el país, sino también promover un crecimiento sostenible que tenga en cuenta tanto las necesidades ambientales como las sociales.

La importancia de la geotermia en Colombia no solo radica en su capacidad para generar energía limpia, sino también en su contribución a diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, esta fuente renovable puede jugar un papel fundamental en el desarrollo económico regional, con aplicaciones en sectores como el turismo y la agricultura. El respaldo del BID y la colaboración de instituciones como la Universidad Nacional de Colombia y el Servicio Geológico Colombiano han sido cruciales para el avance de esta tecnología en el país.

2.1.4 Evaluación de factibilidad técnica para una planta geotérmica en paipa-iza, Boyacá.

Este artículo no fue encontrado por las bases de datos, pero se encuentra información que aporta a la investigación y este tiene el objetivo principal de la investigación se centró en evaluar la factibilidad técnica para la implementación de una planta geotérmica en Paipa-Iza, Boyacá. Este objetivo se desglosó en cuatro metas específicas: la caracterización del fluido geotérmico, el diseño de un sistema de generación de vapor limpio utilizando el calor de un reservorio geotérmico, el diseño de la turbina de vapor para la generación eléctrica, y la determinación de las condiciones de reinyección del fluido geotérmico en el yacimiento para prevenir la degradación del recurso.

La caracterización del reservorio geotérmico se llevó a cabo mediante estudios de prefactibilidad, donde se determinaron la temperatura, presión y flujo geotérmico. Se identificó una temperatura en un rango de 200-230 °C, indicando la presencia de un vapor de alta entalpía, y su potencial aplicación directa a través de un sistema de carácter flash. La presión se estableció en un rango de 1000 a 2000 Kpa (kilopascal) unidad de medida de presión, con un flujo de entrada de 28,26 kg/s. Estos datos respaldaron la evaluación de una producción de 10 MW,

comparada con el desempeño de tres plantas de referencia (Valle Secolo, Miravalles, Beowawe) utilizando software de simulación CHEMCAD.

La eficiencia de la planta geotérmica se evaluó en función de la cantidad de flujo requerido, donde una menor cantidad de flujo masivo para la misma potencia implicaría una mayor eficiencia.

El diseño de los equipos del sistema se basó en las temperaturas de entrada y salida de las diferentes tuberías, la presión del sistema y las propiedades térmicas de los fluidos y materiales, priorizando aquellos con una mayor resistencia a la corrosión causada por los fluidos geotérmicos [11].

2.1.5 Hacia la sustentabilidad social de proyectos geotérmicos en México.

En el ámbito del desarrollo de proyectos geotérmicos, se reconoce la importancia de abordar de manera integral los aspectos económicos, ambientales y sociales. En este contexto, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los proyectos geotérmicos en México, con un enfoque particular en el aspecto social. El objetivo principal de esta investigación es proponer una guía de buenas prácticas destinada a los proyectos geotérmicos en México, con el fin de impulsar su desarrollo sustentable y fomentar relaciones efectivas entre los principales actores involucrados: la comunidad, las empresas o desarrolladores, el gobierno y los consultores o expertos.

Para alcanzar este objetivo, se realiza una revisión detallada y caracterización de los factores que contribuyen a la sustentabilidad social de los proyectos geotérmicos, identificando aquellos que han sido relevantes en proyectos anteriores, los que siguen siendo pertinentes en la actualidad y los que deben considerarse en el futuro. Se tomaron como casos de estudio dos centrales geo termoeléctricas en México, además de analizar ejemplos de tres países que han implementado prácticas destacadas en sustentabilidad social en proyectos geotérmicos. Además,

se consideran los lineamientos desarrollados por organismos internacionales respecto al tratamiento social de proyectos energéticos.

El análisis realizado revela los desafíos que enfrenta la geotermia en México, particularmente en el contexto de la Reforma Energética de 2014. Se destaca la importancia de generar mecanismos que faciliten la colaboración entre los distintos actores involucrados y la implementación simultánea de iniciativas, programas, planes de fomento y oportunidades, como vías para superar estos retos y promover un desarrollo sustentable en el sector geotérmico [12].

2.1.6 Guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos

La "Guía para Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos" representa un esfuerzo conjunto entre la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) dirigido a proporcionar a los países de la región un recurso integral y detallado que les permita explorar y aprovechar de manera efectiva sus recursos geotérmicos. Este documento se inserta dentro de un conjunto más amplio de herramientas destinadas a impulsar el desarrollo energético sostenible en la región, abordando específicamente la utilización de la energía geotérmica como una fuente alternativa para satisfacer parcialmente las demandas energéticas de los países.

El proceso de elaboración de esta guía y otros documentos afines surge del reconocimiento de la importancia estratégica de los recursos geotérmicos en la región y del compromiso compartido de OLADE y el BID para apoyar su aprovechamiento. Estos esfuerzos se alinean con la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles y la reducción de la dependencia de fuentes tradicionales no renovables.

La guía aborda aspectos metodológicos relacionados con los estudios de reconocimiento y prefactibilidad en el contexto de la investigación geotérmica inicial. En ella se incorporan los

avances tecnológicos más significativos, destacando los métodos más eficientes y económicamente viables para identificar las principales zonas geotérmicas y evaluar el potencial de los yacimientos. Además, se ofrece orientación sobre las mejores prácticas y enfoques para llevar a cabo estos estudios, lo que proporciona una base sólida para la planificación y ejecución de proyectos geotérmicos en la región. La primera fase corresponde a la recopilación de la información geocientífica existente, la cual es crucial para entender el entorno y las características del área de estudio. La segunda fase implica la evaluación de esta información, donde se determina el potencial geotérmico y se identifican áreas prioritarias para futuras exploraciones. La tercera fase se centra en la evaluación detallada del área, incluyendo estudios de gradiente térmico y la perforación de pozos que permiten medir las variaciones de temperatura y calcular el flujo térmico, esencial para estimar el potencial energético a profundidad. Finalmente, la cuarta fase es la definición de las inversiones y la estructura técnica necesarias para llevar a cabo la exploración exhaustiva y la posterior explotación del recurso.

El artículo representa una valiosa herramienta para los países latinoamericanos que desean desarrollar su capacidad geotérmica, ofreciendo orientación técnica y metodológica para aprovechar de manera sostenible esta importante fuente de energía renovable. Su elaboración es el resultado de una colaboración estratégica y refleja el compromiso compartido de promover el desarrollo energético sostenible en la región [13].

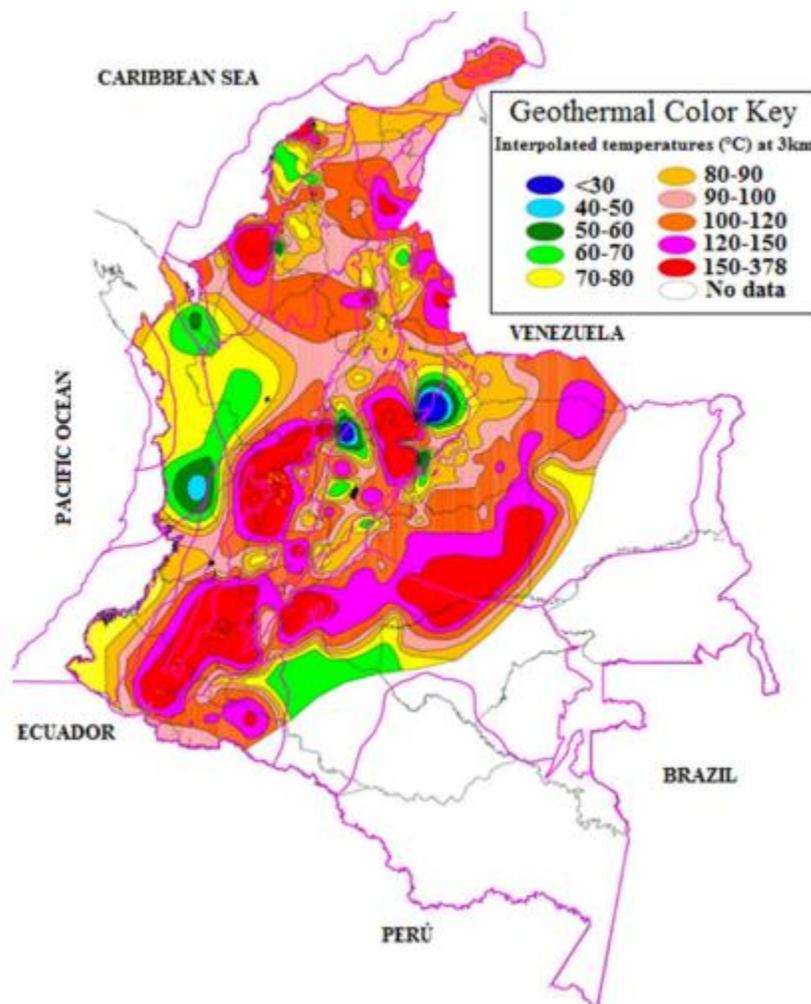
2.1.7 Geothermic Characteristics and trends in geothermal development and use, 1995 to 2020

El estudio de los recursos geotérmicos en la República de Colombia fue realizado en 1981 y 1982 por parte de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) en cooperación con ICEL (Instituto Colombiano de Energía Eléctrica). El objetivo del proyecto era realizar una selección final de las áreas de interés geotécnico más importantes del país. El estudio cubrió un

área de aproximadamente 100.000 Km² e incluyó las cordilleras central y occidental, que tienen actividad volcánica reciente y presencia de aguas termales en la superficie, así como la cordillera oriental, que tiene actividad volcánica y presencia de aguas termales menos recientes. Estos estudios demostraron que Colombia cuenta con áreas geotécnicas de interés para la instalación de hasta 1000 MW de capacidad de generación [14].

La Figura 1 muestra un mapa del potencial geotérmico de Colombia en términos de los rangos de temperatura accesibles hasta una profundidad de tres kilómetros. Demuestra que las regiones más prometedoras en términos de uso energético se encuentran en la zona andina, donde se encuentran una gradiente térmica de hasta 127 °C/km. En estas regiones se pueden encontrar suficientes recursos térmicos para proyectos de generación a pequeña escala, donde los fluidos calientes se encuentran a profundidades entre 500 y 1000 m [14].

Figura 1 Mapa de Colombia lugares de mayor capacidad de calor concentrado [14]



2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 Panorama energético mundial en geotermia

A nivel global, se destaca un crecimiento sostenido en la capacidad de generación de energías renovables, particularmente en la solar fotovoltaica, la cual ha experimentado un aumento significativo, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En conjunto, las energías renovables están desempeñando un papel cada vez más crucial en el suministro energético total, con un crecimiento notable en las energías solar y

eólica, y manteniendo la hidroeléctrica como una fuente importante. Este cambio refleja una tendencia mundial hacia el uso de recursos energéticos más limpios y sostenibles, a medida que las políticas y las inversiones se orientan hacia la mitigación del cambio climático.

La energía geotérmica no solo es relevante para la generación de electricidad, sino que también tiene aplicaciones en calefacción, turismo y agricultura. Las fases clave para desarrollar proyectos geotérmicos comprenden la realización de estudios geocientíficos, la evaluación del potencial geotérmico y la perforación de pozos para medir el gradiente térmico y calcular el flujo de energía.

El calor que se almacena en el subsuelo de la Tierra se conoce como energía geotérmica, el vapor puede llegar a la superficie para llevar este calor. Si la temperatura del recurso geotérmico es adecuada, se puede utilizar la energía para producir electricidad de manera limpia.

La energía geotérmica, aprovechando sus características para sistemas de climatización sostenibles y eficientes, puede ser utilizada para refrigeración y calefacción si la temperatura es más baja. La energía geotérmica se convierte en una fuente importante de energía renovable para una variedad de usos debido a su versatilidad.

Capacidad instalada total: Alrededor de 16 gigavatios (GW) de energía geotérmica se instalaron en todo el mundo en el año 2023. Debido a los costos iniciales y la complejidad de los proyectos geotérmicos, esta capacidad ha estado aumentando lentamente [9].

Generación anual: En 2023, la energía geotérmica generó aproximadamente 95 TWh de electricidad al año. Gracias a la mejora en la eficiencia de las plantas existentes y a la implementación de nuevos proyectos, esta cifra muestra un incremento gradual en comparación con años anteriores [9].

Participación en el mercado total: La energía geotérmica representa menos del 1% de la generación total de electricidad en el mundo y representa una pequeña parte del sistema energético global. A pesar de ser una fuente confiable y estable de energía renovable. En comparación con otras tecnologías renovables, como la solar y la eólica, su adopción es limitada [9].

Participación en el mercado de energías renovables: La energía geotérmica representa aproximadamente el 3% de la capacidad instalada y de la generación anual en el ámbito de las energías renovables. En comparación con la preponderancia de la energía solar y eólica, las cuales juntas representan la mayor parte de la capacidad renovable instalada, este porcentaje es modesto [9].

Principales países generadores: Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, Turquía y Nueva Zelanda son países líderes en la producción de energía geotérmica. El productor más grande es Estados Unidos, con una capacidad instalada de más de 3,7 GW; a continuación, Filipinas e Indonesia tienen una capacidad instalada de aproximadamente 1,9 GW y 2,1 GW, respectivamente [9].

2.2.2 *Sistemas geotermales*

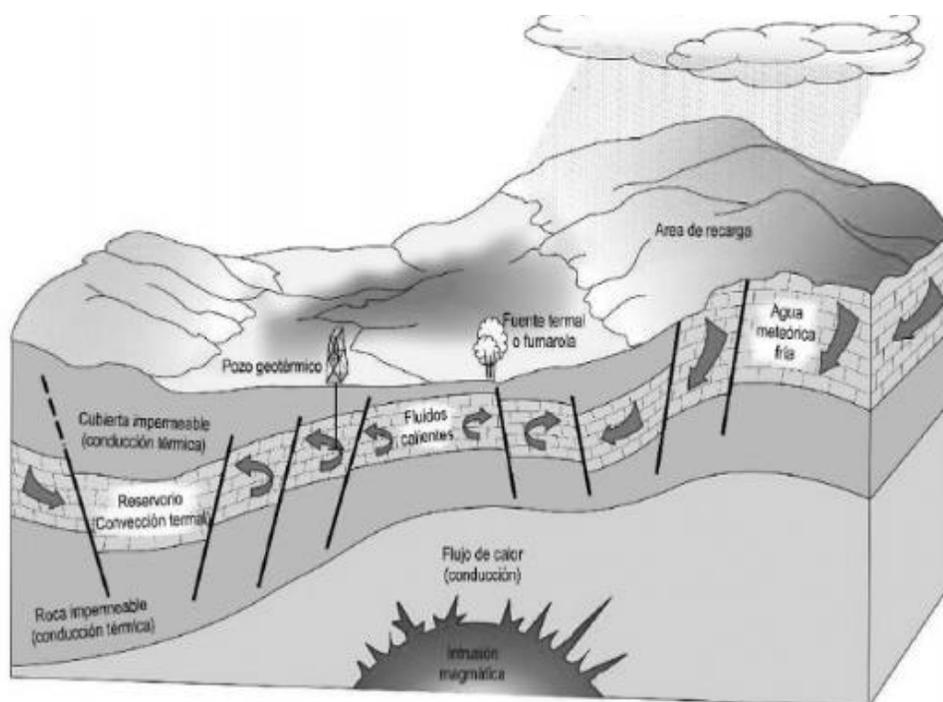
Un sistema geotérmico está constituido por tres elementos principales: una fuente de calor, un reservorio y un fluido, el cual es el medio que transfiere el calor. La fuente de calor puede ser tanto una intrusión magmática a muy alta temperatura ($> 600^{\circ}\text{C}$), emplazada a profundidades relativamente pequeñas (5-10 km) o en sistemas de baja temperatura.

El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen el calor. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables y se encuentra conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua meteórica puede reemplazar

los fluidos que emergen del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos [15].

El fluido geotermal es agua, en la mayoría de los casos de origen meteórico, ya sea en fase líquida o en fase gaseosa, dependiendo de su temperatura y presión. La figura 2 que se muestra a continuación es una representación simplificada de un sistema geotérmico ideal. La planta de generación se debe implementar en un sitio donde el calor térmico sea constante, sostenible y con alta rentabilidad, lo anterior se realiza de manera limpia y reciclando los fluidos, minimizando el impacto ambiental.

Figura 2 Ciclo del agua para evaporación a través de las capas de la terráqueas [15]



2.2.3 *Energía geotérmica*

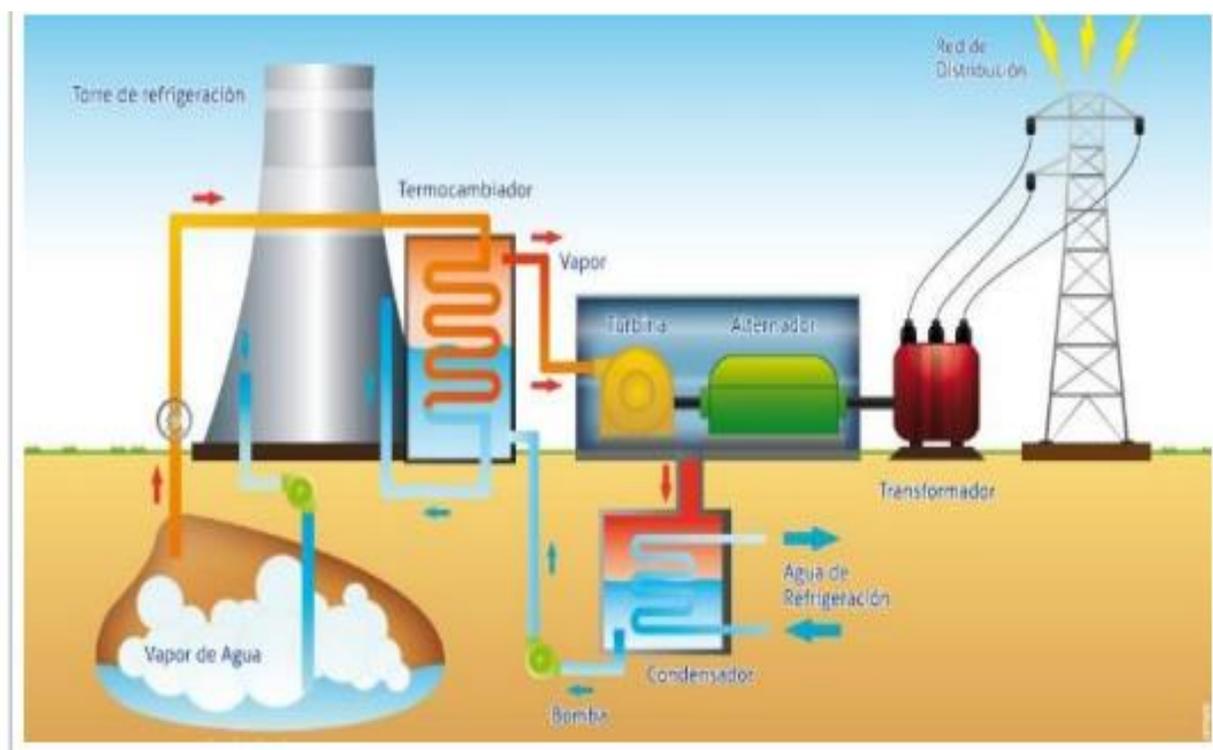
La energía geotérmica es un tipo de energía renovable que se obtiene del calor del interior de la tierra. El magma existente en el centro de la tierra o la roca supercaliente debajo de la corteza terrestres, es la clave para el proceso de generación eléctrica ya que al capturar el calor y someterlo a su desplazamiento por tubería de alta presión hacia la turbina de generación eléctrica, esta trabaja de manera constante, de tal manera que este proceso es eficiente [16].

El proceso de una planta geotérmica, empieza con la perforación de pozos hasta llegar a la corteza más cercana del magma, ya que en profundidades mayores de 50 km de excavación pasando por las cortezas terrestres de la tierra se tiene un acercamiento hacia el centro del planeta este almacena el calor suficiente para manifestar de una manera aprovechable, posteriormente se realizan varias perforaciones en búsqueda de pozos reservorios de agua los cuales se encuentran en distintas zonas internas de la tierra, estos pozos son naturales ya que existen cuevas internas de la tierra donde se acumula el agua y es calentada de manera natural por el calor interno de la tierra gracias a el color extremo, conllevando a que el agua se convierta rápidamente en vapor.

Este vapor se empuja a presión hacia la superficie donde se ubican tanques reservorios, una vez el vapor se desplaza entre tuberías de alta presión la cuales son especiales para el proceso de desplazamiento del vapor, esta tubería está conectada a las turbinas que generan una fuerza mecánica generando un movimiento interno o simplemente girando. El sistema está conectado a través de espigos creando un nuevo movimiento en los generadores eléctricos los cuales están realizando un intercambio de energía entre fuerza mecánica en el giro este se convierte un campo electromagnético dentro del generador para que al final se convierte en energía eléctrica. La potencia generada es llevada a hacia un transformador elevador y finalmente exportada a la línea de comunicación de suministro eléctrico residencial.

Después de exportar la electricidad, el ciclo de trabajo de una planta geotérmica es realizar el enfriamiento, en donde el vapor se convierte en agua y así se repite el ciclo de generación una y otra vez, haciendo que la producción de energía sea de manera constante y sostenible. Todo el proceso explicado a detalle anteriormente se puede evidenciar de una manera más comprensible en la figura 3.

Figura 3 Proceso de generación eléctrica por geotérmica [18]



2.2.4 Proyecto de energía geotérmica profunda

A continuación, se presenta un texto ampliado y detallado que aborda los conceptos de Columna de Perforación (Drill String), Atascamiento de la Broca (Bit Balling) y Contrapresión (Back Pressure), subrayando su importancia en el contexto de la perforación de pozos geotérmicos:

Drill String (Columna de Perforación): La columna de perforación es un conjunto de tubos conectados entre sí, usados durante la perforación de pozos geotérmicos [17]. Su función principal es transferir el movimiento rotatorio desde la superficie hasta la broca que perfora el fondo del pozo. Además, permite que el lodo de perforación circule, lo que ayuda a enfriar la broca, eliminar los fragmentos de roca y mantener el pozo estable. Dado que los pozos geotérmicos se encuentran a grandes profundidades, donde la temperatura y la presión son muy altas, es crucial que esta estructura sea resistente para evitar fallas.

Bit Balling (Atascamiento de la Broca): El atascamiento de la broca ocurre cuando los fragmentos de roca cortados se acumulan en la broca, dificultando su movimiento y eficiencia [17]. En la perforación geotérmica, esto puede ser un problema común, especialmente en formaciones rocosas difíciles o cuando el material es pegajoso. Este problema reduce la capacidad de la broca para perforar, aumenta el desgaste de las herramientas y puede provocar paradas frecuentes para limpiar o reemplazar la broca. Evitar este problema es clave para mantener una perforación eficiente y evitar costos adicionales.

Back Pressure (Contrapresión): La contrapresión es la presión que se aplica desde la superficie del pozo para controlar la presión interna durante la perforación [17]. En la perforación de pozos geotérmicos, es crucial manejar bien esta presión para evitar problemas como la liberación descontrolada de fluidos o la entrada de fluidos no deseados en el pozo. Además, ayuda a mantener la estabilidad del pozo, especialmente en formaciones rocosas con

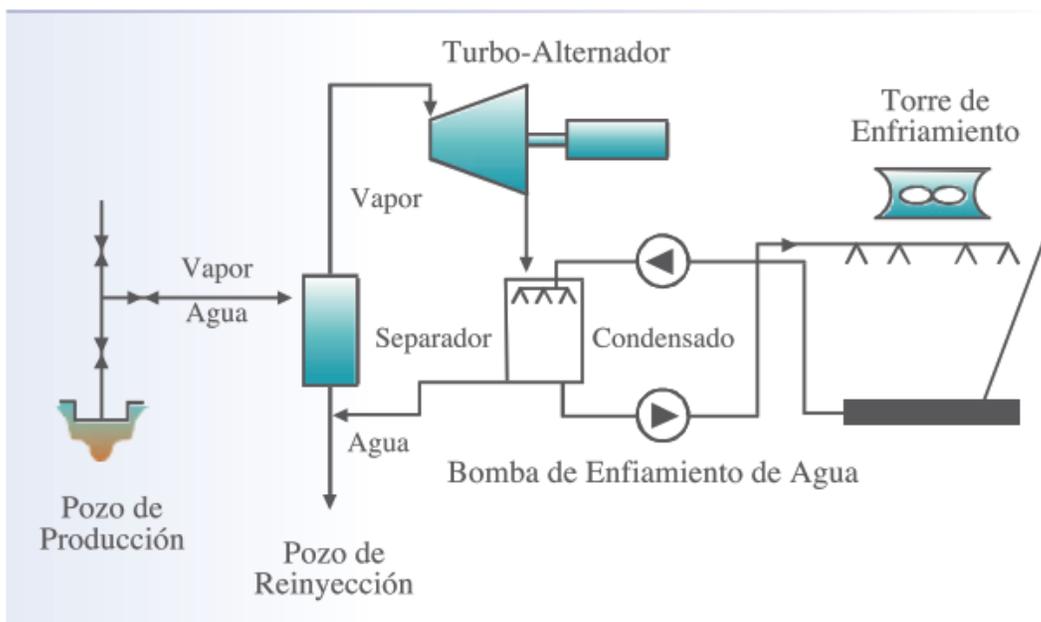
alta presión. Un control adecuado de esta presión es esencial para garantizar la seguridad y el éxito de la perforación.

2.2.5 Eficiencia en las plantas de generación geotérmica

En el artículo titulado “Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia” se mencionan dos tipos de plantas geotérmicas y turbinas que ofrecen alta eficiencia en la generación de energía geotérmica, las cuales son:

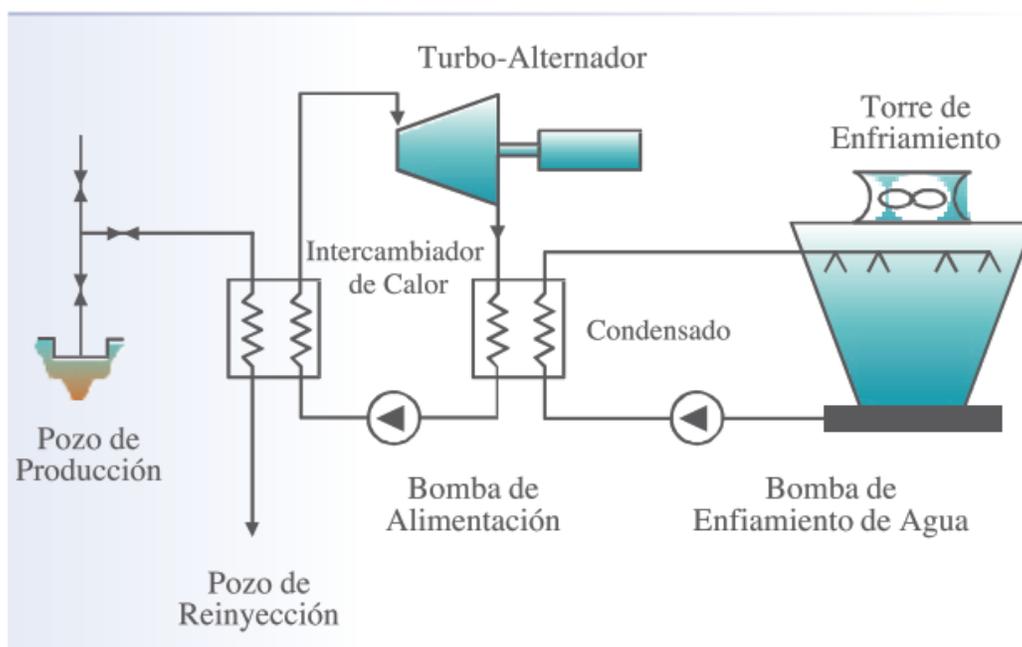
- A. **Flash**: también denominada abierta o de vapor directo. Esta tecnología se utiliza cuando se tienen fluidos geotérmicos con temperaturas superiores a los 200 °C en planta. Los fluidos geotérmicos pasan por un separador de vapor y agua, el vapor se inyecta a una turbina que a su vez mueve el generador eléctrico, pasando luego a un condensador. El fluido geotérmico que ha cedido el calor retorna al reservorio mediante pozos de reinyección [10].

Figura 4 Planta tipo Flash [10]



B. **Binaria:** también se conoce como de ciclo cerrado. Esta tecnología se utiliza cuando se tienen fluidos geotérmicos con temperaturas inferiores a los 200°C en planta. En la tecnología binaria, los fluidos geotérmicos calientan un compuesto orgánico por medio de un intercambiador de calor, se usan compuestos orgánicos como n-pentano o amoniaco, entre otros, que tienen bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a bajas temperaturas. El vapor del compuesto orgánico es inyectado a una turbina que, a su vez, mueve un generador eléctrico, pasando luego a un condensador y retornando al ciclo. el fluido geotérmico que ha cedido el calor retorna al reservorio mediante pozos de reinyección [10].

Figura 5 Planta tipo Binaria [10]



La eficiencia de los sistemas geotérmicos en la conversión de energía, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{n} = WxE \quad (1)$$

W: potencia eléctrica entregada a la red

E: energía específica del fluido geotérmico en el yacimiento

Para calcular la energía entregada a la red se calcula con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{E} = hP_1T_1 - P_0T_0 - T_0(sP_1T_2 - s(P_0T_0)) \quad (2)$$

h: es una medida de la cantidad total de energía en un sistema termodinámico, que incluye tanto la energía interna del sistema como el producto de su presión y volumen. En el contexto de los sistemas geotérmicos, la entalpía específica se refiere a la cantidad de energía disponible por unidad de masa del fluido geotérmico en el yacimiento

s: entropía en el yacimiento

P₁ = presión en estado estacionario (en el yacimiento)

T₁ = temperatura en el estado estacionario (en el yacimiento)

P₀ = presión en la planta

T₀ = temperatura en la planta

De la anterior fórmula se comprende que la eficiencia de una planta se relaciona con la energía producida y exportada a la red eléctrica, es importante mencionar que la eficiencia lleva variables que son dispersas, nunca pueden tener un valor constante, ya que pueden ser afectadas por los cambios de temperatura de los pozos y esto afecta en la presión del vapor de agua, bajando considerablemente la generación y su exportación a la red.

Tomando en cuenta la importancia que tiene la presión y la temperatura de los fluidos geotérmicos en la generación eléctrica, existen diferentes tipos de turbinas de vapor que puede variar su eficiencia y capacidad.

- A. ***Turbina de contrapresión:*** la salida del vapor de la turbina se encuentra a una presión superior a la atmosférica, el vapor es más fácil de transportarlo y puede ser utilizado en otros procesos [10].
- B. ***Turbina de condensación:*** el vapor, a la salida de la turbina, entra a un intercambiador de calor donde se condensa, generando vacío y un empuje adicional en la turbina. El vapor condensado es transportado para su reinyección al campo geotérmico. Los fluidos geotérmicos una vez usados para generación de energía pueden ser utilizados como fuente de calor en agricultura, piscicultura, para su distribución como un servicio público de calefacción o con fines turísticos [10].
- C. ***Turbinas de una o varias etapas:*** de acuerdo con la temperatura y presión de los fluidos geotérmicos se pueden instalar turbinas de una etapa, en las que el vapor que sale de la turbina va al condensador y de allí al pozo de reinyección. En las turbinas de varias etapas él vapor sale de una sección de la turbina que opera a alta presión y entra a otra que trabaja con vapor de menor presión, y así sucesivamente, hasta que el vapor pierde su capacidad de trabajo y es descargado en el condensador para su reinyección al campo geotérmico [10].

2.2.6 Contexto general de la energía geotérmica

La capa interna de la tierra está conformada por un núcleo y unas subcapas que se encuentran ubicadas entre los 5150 km y 6378 km, estas están compuestas por un revestimiento de espesor de 30 km y se adelgazan en zonas oceánicas a 10 km.

El calor se desplaza desde el interior de la Tierra hacia la superficie, impulsado por las altas temperaturas en las regiones más profundas del planeta. Aunque se estima que la temperatura en el núcleo interno de la Tierra está entre 5500 y 6000 °C, la temperatura en el manto superior, la base de la corteza terrestre, puede variar significativamente dependiendo de la región y profundidad. Este proceso crea un gradiente geotérmico, lo cual significa que la temperatura va subiendo a medida que se acerca hacia la capa exterior de la Tierra. Se estima que este gradiente aumenta aproximadamente unos 3°C por cada 100 metros [18].

A medida que la Tierra desciende hacia sus capas más profundas, la temperatura aumenta constantemente con el tiempo. Después del límite terrestre, que tiene una profundidad media mayor, de unos 30 a 50 kilómetros, la temperatura aumenta con la profundidad.

“El calor es una forma de energía, la energía geotérmica es el calor contenido dentro de la tierra y es transferido a la superficie, este se transfiere a la corteza del planeta; su utilización va desde el uso directo sin ninguna transformación de la misma a la generación de electricidad por medio de plantas geotérmica” [18].

En la Figura 5 se observan las zonas geotérmicas favorables para la generación de electricidad, llamadas así debido a que son áreas activas de la corteza terrestre situadas en los límites de las placas tectónicas, y que poseen recursos de temperatura media y alta. Entre estas áreas, destaca el Cinturón de Fuego del Pacífico [18].

Figura 6 Cinturón de fuego en mapamundi [18]



2.2.7 Energía geotérmica: una alternativa para la matriz eléctrica a nivel mundial

La energía geotérmica surge como una opción destacada para diversificar la matriz energética global, gracias a su alta eficiencia y capacidad para generar electricidad de manera continua. Esta característica la diferencia de otras fuentes renovables, como la solar y la eólica, que dependen de condiciones climáticas variables. La operación constante de las plantas geotérmicas proporciona estabilidad al suministro eléctrico, una forma esencial para satisfacer las crecientes demandas energéticas, con una baja huella de carbono, la energía geotérmica se posiciona como una solución favorable en la lucha contra el cambio climático. Países como Islandia y Nueva Zelanda han demostrado el éxito de esta tecnología, no solo en la generación de electricidad, sino también en el desarrollo de métodos avanzados para su explotación sostenible.

Estos ejemplos evidencian el potencial de la geotermia para contribuir a la seguridad energética, al mismo tiempo que se reduce la dependencia de los combustibles fósiles.

Los proyectos geotérmicos ofrecen importantes beneficios económicos y sociales, como la creación de empleo y el impulso a industrias conexas, incluyendo el turismo y la agricultura.

La gran dificultad es la localizar zonas geotermias alrededor del planeta para la generación de electricidad, se convirtió en el mayor desafío a lo que respecta la generación, debido a las condiciones naturales que se necesitan y si dificultad para poder encontrarlas, sin embargo, estas zonas poseen una tendencia geológica de ubicación en zonas volcánicas, esto se evalúa con casos de éxito en el mundo y con su ubicación su potencia geotérmica de un país, la gráfica que ayuda a encontrar lugares de generación eficiente es la siguiente:

Figura 7 Localización de zonas volcánicas, [64]



De la figura 6 se puede localizar los lugares donde ya están las plantas geotérmicas por la figura 7, se puede evidenciar que en Latinoamérica no es muy aprovechada esta fuente de generación a diferencia de otros lugares. En la figura 8 el mapa muestra la distribución global de sitios de generación eléctrica mediante energía geotérmica entre 1995 y 2020. La mayor

concentración de estos sitios se encuentra en regiones volcánicas y tectónicamente activas, como la costa oeste de Estados Unidos, América Central, Islandia, Japón, Filipinas e Indonesia. La geotermia se explota principalmente en países con la infraestructura y tecnología adecuadas, destacando su uso en América del Norte, partes de Europa, y Asia-Pacífico. África y Sudamérica muestran un desarrollo más limitado en este ámbito, destacando que el país con más generación eléctrica mediante energía geotérmica fue China.

Figura 8 Generación de Electricidad a través de Geotermia 1995-2020, [54]



3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

La investigación se enfoca en analizar de manera descriptiva una serie de variables tanto cuantitativas como cualitativas relacionadas con proyectos de excavación. En el ámbito cuantitativo, se abordan aspectos tales como la ejecución de operaciones de exploración, la recolección de datos técnicos de excavación, las condiciones técnicas para la sostenibilidad del proyecto, la dificultad inherente a este tipo de proyectos y la eficiencia que caracteriza su ejecución.

Por otro lado, en el ámbito cualitativo, se considera el costo de los equipos de excavación, la capacidad de generación, el costo de la energía y el costo de inversión. Este enfoque integral tiene como objetivo ofrecer una visión completa de los aspectos operativos, económicos y de gestión que influyen en la ejecución y viabilidad del proyecto.

3.2 Diseño

El diseño se basa en la Revisión Sistemática de Literatura de la Universidad de Keele [1], [2]. A continuación, se explica brevemente el proceso de RSL (Revisión Sistemática de Literatura), sigue un protocolo predefinido que incluye la formulación de una o varias preguntas de investigación claras y específicas, la definición de criterios de inclusión y exclusión, la búsqueda exhaustiva de la literatura en diversas fuentes, la evaluación crítica de la calidad de los estudios seleccionados y la síntesis de los hallazgos para obtener conclusiones robustas.

El uso de la RSL en la Universidad de Keele se enfoca en garantizar la validez y la confiabilidad de la revisión, minimizando declives y asegurando que se incluyan todos los estudios relevantes. Este enfoque sistemático permite a los investigadores de la Universidad de Keele obtener una visión integral de la evidencia disponible, identificar lagunas en la

investigación y contribuir de manera significativa al avance del conocimiento en su campo de estudio.

En resumen, la RSL en la Universidad de Keele es una herramienta metodológica clave que proporciona una base sólida para la toma de decisiones informada y la generación de nuevo conocimiento, asegurando que la investigación se realice de manera exhaustiva, transparente y basada en la evidencia.

3.2.1 Planificación

En primer instante se debe crear una cadena de búsqueda la cual debe incluir conectores lógicos AND y OR, esta debe contener palabras claves que crean un patrón de búsqueda en las bases de datos a utilizar, las palabras deben tener como principal tema de búsqueda la generación eléctrica a través de geotérmica, esta búsqueda se realiza en inglés ya que la mayoría de artículos publicados son en este idioma.

3.2.2 Búsqueda

Para la búsqueda se debe determinar los sitios web de donde se van a extraer los artículos de geotermia, en internet existen diferentes plataformas de base de datos de donde se pueden extraer información publicada que aporten a la investigación las unas de las plataformas son Redalyc, IEEE Xplore, Scopus, Web of Science y RefSeek.

3.2.3 Selección de artículos

Para los artículos de selección se crean unos criterios de búsqueda de inclusión y exclusión los cuales son; artículos que sean científicos, descartar por título, abstract, documentos publicados en los últimos diez años, área de ingeniería, exclusión de revistas y artículos repetidos.

3.2.4 Evaluación

Para la evaluación de los artículos, es necesario realizar una lectura minuciosa, enfocándose en encontrar respuestas a las preguntas de investigación planteadas en la descripción del problema. Este proceso permite identificar aquellos artículos que proporcionan información relevante y significativa, contribuyendo para la elaboración de las conclusiones de esta investigación.

3.2.5 Extracción y síntesis

Se planifica un proceso sistemático de la literatura comienza con la identificación de respuestas clave de los estudios seleccionados, que se organizan en una matriz de clasificación. Esta matriz se utiliza para organizar la información y facilitar la comparación y análisis de las respuestas. Estas respuestas se resumen y se destacan las más relevantes y comunes entre los documentos revisados. Este enfoque permite la construcción de un cuerpo coherente de conocimiento que respalda las hipótesis de investigación y proporciona una base sólida para futuras investigaciones en esta área. Además, este proceso contribuye a una comprensión más profunda de este tema y resalta la necesidad de realizar investigaciones adicionales para desarrollar aún más este campo.

3.3 Universo y muestra

Artículos científicos extraídos de revistas indexadas que contengan información relacionada con proyectos de energía geotérmica.

3.4 Técnicas en la relación de información

Estas técnicas de información o de recolección de información son primordialmente la búsqueda en bases o nubes de datos como en este caso lo son Scopus e IEEE Xplore, obteniendo la gran mayoría de artículos provenientes en estas plataformas.

3.5 Instrumento de recolección

El principal elemento o instrumento de recolección que se emplea es una hoja de cálculo de EXCEL, donde se guarda la información leída y se encuentran similitudes en las respuestas de las preguntas de investigación, para así poder guardar y analizar los datos estadísticos.

4. Resultados

4.1 Selección de artículos mediante revisión de literatura

La Revisión Sistemática de Literatura (RSL) es una metodología rigurosa y estructurada utilizada para analizar de manera exhaustiva y objetiva la investigación existente sobre un tema específico. En esta investigación, se empleó la metodología de la Universidad de Keele [1]. Esta técnica implica la búsqueda, identificación, evaluación y síntesis de estudios relevantes, con el objetivo de obtener una comprensión completa del estado actual del conocimiento en el área de interés, el método explica la forma de búsqueda de información en bases de datos reconocidas que proporcionan artículos científicos. Para la búsqueda de información relevante se debe determinar las preguntas de investigación, con estas ya planteadas enfocarse en la búsqueda de información que respondan las preguntas de investigación, con las respuestas encontradas se crea un archivo de metadatos donde se debe almacenar la información más relevante y con datos exactos que respondan las preguntas de investigación, finalmente con lo anterior se llega al análisis de respuestas y conclusiones para futuros trabajos.

4.1.1 Planificación

Se utilizó la siguiente cadena de búsqueda con conectores lógicos y con palabras claves que ayudaron a encontrar los artículos relacionados con generación eléctrica a través de geotermia, la cadena de búsqueda está en inglés ya que los artículos son publicados en este idioma “((“geothermal” OR “geothermics”) AND (“energy generation” OR “energy yield” OR “energy source” OR “energy production” OR “power generation” OR “power yield” OR “power source” OR “power production”)) AND “projects”)”.

La cadena de búsqueda, diseñada con precisión, fue clave en este proceso. Se emplearon términos y combinaciones de palabras relevantes para el tema de estudio, optimizando así la identificación de artículos científicos pertinentes a generación eléctrica a través de geotermia. Este enfoque sistemático permitió refinar la búsqueda y obtener resultados más específicos, contribuyendo a la eficiencia del proceso de revisión.

La utilización de una cadena de búsqueda en conjunción con bases de datos reconocidas no solo facilitó la localización de estudios clave, sino que también aseguró la consistencia y la reproducibilidad del proceso. De esta manera, se estableció una base sólida para la revisión sistemática, permitiendo la evaluación crítica y la síntesis de la literatura existente en el campo de investigación.

4.1.2 Búsqueda

En la búsqueda se determinó utilizar dos fuentes de bases de datos las cuales son Scopus e IEEE Xplore, consideradas por su amplitud y diversidad en cuanto a documentos científicos y técnicos. La recolección de artículos es exitosa gracias a la aplicación de la cadena de búsqueda, inicialmente obteniendo un total de 260 artículos sin aplicar los criterios de búsqueda, relacionados con la generación eléctrica a través de geotérmica.

4.1.3 Selección de artículos

En el proceso de exclusión, se aplicaron criterios específicos para filtrar los resultados de búsqueda. Se excluyeron artículos por título repetido, abstract, documentos publicados en los últimos diez años, documentos del área de ingeniería, revistas, artículos repetidos, conferencias, libros y artículos que presentaran análisis matemáticos porque la información identificada en el proceso de calidad no proporciona contenidos que aporten a la investigación. Se centraron en

documentos que se alinearan más estrechamente con los objetivos y el enfoque de la revisión sistemática.

Esta cuidadosa selección de fuentes y la aplicación de criterios específicos no solo garantizan la calidad y relevancia de los documentos incluidos, sino que también contribuyen a la eficiencia del proceso de revisión al reducir la cantidad de información no pertinente. En consecuencia, se optimiza la identificación de estudios científicos pertinentes y se fortalece la base sobre la cual se realizarán los análisis críticos y la síntesis de la literatura en el campo de la ingeniería.

Se obtuvieron diversas etapas de aplicación de la metodología de revisión sistemática de literatura de la Universidad de Keele, con el fin de identificar los artículos más acertados en relación con la geotermia. Las bases de datos Scopus e IEEE Xplore son las que proporcionan los artículos con los que se ejecutan los distintos criterios de inclusión y exclusión. Los artículos proporcionados por las bases de datos resultaron en 260 artículos (184 en IEEE Xplore y 76 en Scopus), que corresponden al 100% se debe aplicar los criterios de inclusión y exclusión.

Se aplicó el criterio o filtro de exclusión por artículos repetidos, lo que redujo el conjunto a 145 artículos, esto corresponde al 55.76% de artículos útiles para la investigación. En el siguiente filtro, se realizó la lectura de los resúmenes (*abstract*) buscando información relacionada con las preguntas de investigación, lo cual resultó en 129 artículos correspondiente al 49.61% de documentos. La reducción es mínima ya que en los resúmenes se encuentra valiosa información.

Para aplicar criterios de exclusión de documentos por conferencia, el resultado fue de 93 artículos correspondiente al 35.76% para la investigación. Al aplicar criterios para la cadena de búsqueda, se encontró que en la base de datos IEEE Xplore se mezclaron documentos que no pertenecen a los últimos 10 años por lo que se realizó un filtro en los metadatos llegando a un

total de 72 artículos, que corresponde al 27.69% después de aplicar el filtro. Finalmente, al aplicar filtro de exclusión por títulos ya que tienen la palabra geotermal pero no tiene relación con generación eléctrica y así obteniendo 67 correspondiente al 25.76% de artículos para analizar.

La selección de los artículos es fundamental para el análisis crítico de esta investigación sobre la revisión de literatura de proyectos energéticos basados en energía geotérmica, con un total de 67 artículos finales.

Con lo anterior, se buscan resultados conocidos como los metadatos donde se inicia con la descarga de documentos y posteriormente se realiza la respectiva lectura buscando las respuestas a las preguntas de investigación. Se busca un patrón de similitudes de las respuestas para obtener métodos de ejecución de obra, costos, valores de potencia y de generación. Con esto, se pretende obtener datos importantes y repetitivos que muestren resultados de ejecución de obra para implementarlos en las tablas de recolección de información de cada pregunta de investigación.

4.1.4 Evaluación de resultados

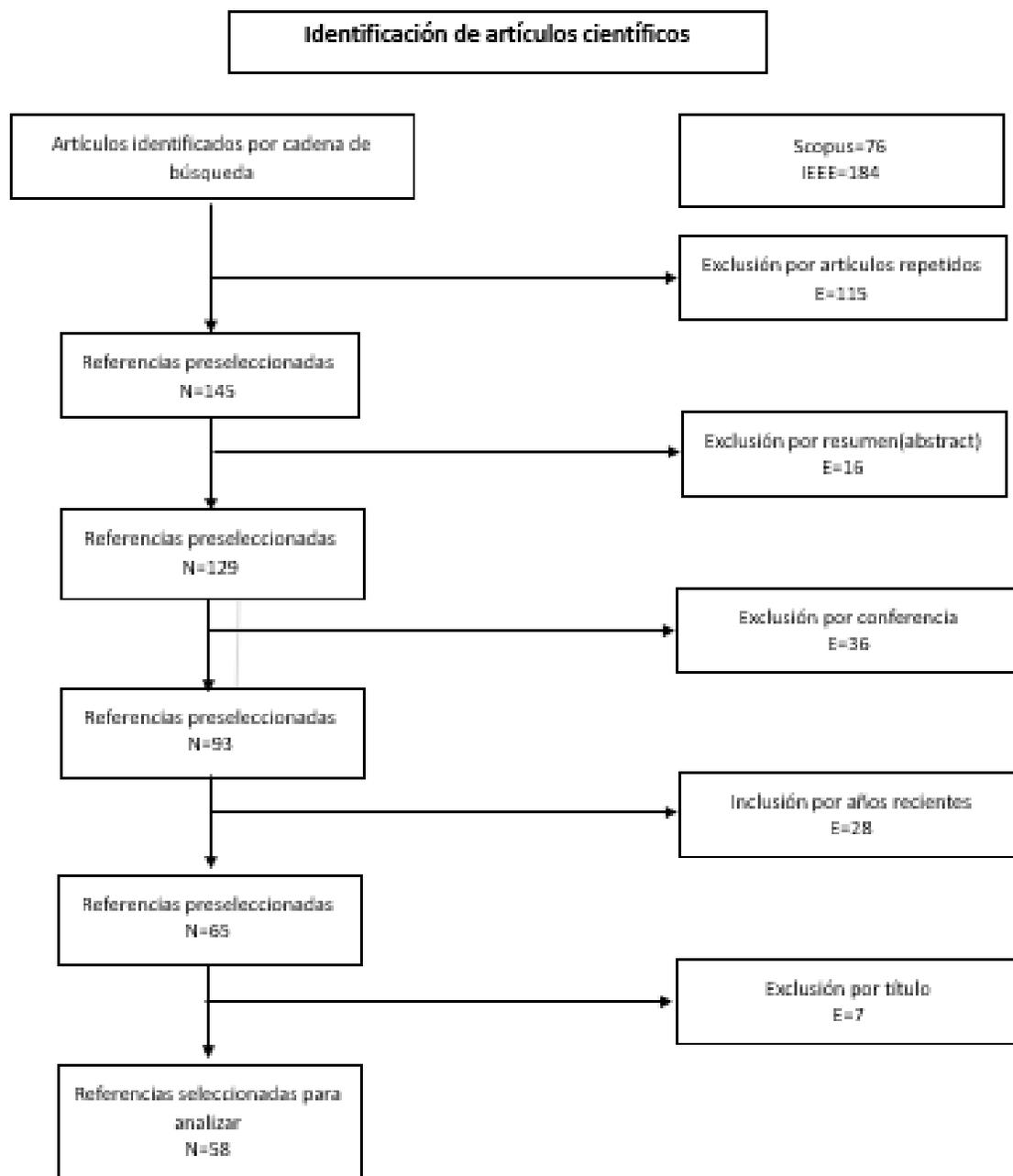
De 260 documentos encontrados por las bases de datos Scopus e IEEE Xplore, finalmente se trabaja esta revisión con 67 documentos que correspondiendo el 25.76% que se debe realizar la respectiva descarga y lectura. Al realizar las actividades anteriores se obtiene que 9 documentos no responden a las preguntas de investigación o no cumplen con los criterios de calidad, esto corresponde al 13.43% de documentos que no dan aportes a las preguntas de investigación.

Dejando así una total de 58 artículos que contienen información, que al menos responden una pregunta de investigación.

La figura 9 se muestra el esquemático PRISMA del proceso empleado para seleccionar y filtrar artículos científicos con el objetivo de llegar a un conjunto final para su análisis.

Este procedimiento asegura que los artículos incluidos sean los más relevantes para el estudio, permitiendo un análisis profundo y centrado en la literatura científica más pertinente.

Figura 9 Esquemático PRISMA de la RSL



La tabla 1 presenta un resumen del archivo de recolección de metadatos en Excel, destacando las respuestas a diversas preguntas relacionadas con proyectos energéticos. Las técnicas de exploración emergen como el tema más destacado, acumulando un 56.89% de las respuestas, lo que subraya su importancia dentro del análisis de estos proyectos. Por otro lado, el costo de los equipos de excavación, con solo un 5.17% de las respuestas, parece generar un interés mucho menor, posiblemente porque es un aspecto menos crítico o menos consultado en la recolección de datos.

La capacidad de generación y el costo de la energía también reciben una atención considerable, con un 17.24% y un 22.41% de las respuestas, respectivamente, lo que indica que estos factores son relevantes en la evaluación de proyectos energéticos. El costo de la inversión, con un 31.03% de las respuestas, se destaca como otro aspecto clave, reflejando la necesidad de un análisis financiero sólido en la planificación y ejecución de estos proyectos. Finalmente, la eficiencia de los proyectos, que obtuvo un 13.79% de las respuestas, demuestra un interés en la optimización y el rendimiento de los mismos, aunque es un aspecto más prioritario según los datos recolectados.

Tabla 1 Resumen del archivo de recolección de los metadatos (Excel).

Pregunta	Respuestas	%
¿Cuáles son las técnicas de exploración?	33	56.89
¿Cuál es el costo de los equipos de excavación?	3	5.17
¿Cuál es la capacidad de generación?	10	17.24
¿Cuál es el costo de la energía?	13	22.41
¿Cuál es el costo de la inversión?	18	31.03
¿Cuál es la eficiencia que tiene este tipo de proyectos?	8	13.79

4.2 Análisis documental de la Revisión Sistemática de Literatura

4.2.1 Técnicas de exploración

De los 58 documentos analizados, 33 detallan la ejecución de técnicas de exploración, lo que representa el 56.89% de los artículos revisados. Las técnicas más utilizadas son la Exploración Geotérmica y Perforación, que constituye el 37.4% del total, seguida del Método Geofísico con el 18.9% y, en tercer lugar, el Modelamiento Geoestadístico 3D con el 8.62%. Estas técnicas son cruciales para obtener los datos necesarios que permiten evaluar la rentabilidad económica de implementar una fuente de generación geotérmica.

La tabla 2 muestra diversas técnicas de exploración geotérmica, se identificaron ocho técnicas distintas, cada una apoyada por múltiples fuentes. La relación de estas técnicas de exploración permite entender cuáles son los métodos más utilizados para la exploración geotérmica. La tabla relaciona la técnica con la fuente, es decir con la referencia bibliográfica del documento que la utiliza.

Tabla 2 Técnicas de exploración

N	Técnicas de exploración	Fuente	%
1	Sistema geotérmico mejorado (EGS)	[19][20]	3.44
2	Exploración geotérmica y perforación	[19][20][21][22][23][24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34][35][36][37][38][39][40]	37.4
3	Método geofísico	[21][23][24][25][26][28][30][31][33][34][41]	18.9
4	Esfera de granito Lipnice	[42]	1.72
5	Sistema geotérmico de pluma de co2	[43]	1.72
6	Modelamiento geoestadístico 3D	[44][45][46][47][48]	8.62
7	Modelamiento de circulación geotérmica	[49] [50]	3.44

8	Método electromagnético de exploración aérea	[51]	1.72
---	--	------	------

Las técnicas de exploración utilizadas por los documentos revisados, se explican a continuación:

4.2.1.1 Sistema de geotermia mejorado (EGS)

Es una técnica avanzada para la explotación de recursos geotérmicos, enfocada en la creación y optimización de fracturas en formaciones rocosas con baja permeabilidad. Este método permite aprovechar el calor geotérmico en las formaciones que normalmente son rentables para la producción de energía [19]. Las fases son:

- **Fracturación Hidráulica:** La inyección de agua a alta presión en la roca genera y amplía fracturas, incrementando la permeabilidad del reservorio y facilitando el flujo térmico.
- **Fracturación Térmica:** El uso de calor induce fracturas en las rocas, aprovechando la expansión térmica para mejorar la conectividad entre las fracturas y el reservorio.
- **Estimulación Química:** La inyección de productos químicos en el reservorio disuelve minerales y aumenta la permeabilidad, mejorando la capacidad de almacenamiento y recuperación de energía.

La implementación de EGS resulta fundamental para la eficiente explotación de recursos geotérmicos, especialmente en regiones con formaciones de roca dura y baja permeabilidad. Esta técnica no solo optimiza la producción de energía, sino que también promueve el uso de fuentes energéticas más sostenibles y limpias, contribuyendo a la reducción de emisiones de carbono [19].

4.2.1.2 Exploración Geotérmica y Perforación:

La exploración geotérmica se dedica a identificar y evaluar recursos de energía geotérmica, almacenados en el subsuelo como calor. La técnica más utilizada para esta exploración es la

perforación, la cual permite acceder a formaciones geológicas y obtener muestras que ayudan a determinar la viabilidad del recurso geotérmico [22]. Las fases corresponden a:

- **Estudio previo y selección del sitio:** Se realizan estudios geológicos y geofísicos para identificar áreas con potencial geotérmico. Estos estudios incluyen la revisión de mapas geológicos, análisis de datos de temperatura del suelo y estudios de actividad sísmica. El sitio se selecciona en función de la probabilidad de encontrar recursos geotérmicos.
- **Preparación del sitio:** una vez seleccionado el sitio, se procede a la preparación del área, esto incluye la limpieza del terreno, la construcción de accesos y la instalación de infraestructura necesaria, como campamentos y sistemas de gestión de residuos. Se cumplen normativas ambientales y de seguridad para minimizar el impacto en el entorno.
- **Instalación del equipo de perforación:** El equipo de perforación se monta e incluye varios componentes clave:
- **Plataforma de Perforación:** estructura que sostiene el equipo de perforación y proporciona acceso al pozo.
- **Torre de perforación:** estructura vertical que sostiene el sistema de perforación y facilita la elevación y descenso de la broca y otros equipos a través del pozo.
- **Sistema de rotación:** compuesto por un motor y un sistema de transmisión que hace girar la broca, proporcionando la rotación necesaria para perforar la roca.
- **Broca de perforación:** herramienta de corte en la parte inferior del sistema de perforación que rompe la roca a medida que se perfora, permitiendo la recolección de muestras.
- **Bomba de circulación:** bomba que impulsa el fluido de perforación hacia el pozo, manteniendo el flujo del fluido y ayudando a limpiar el pozo.

- **Perforación del Pozo:** La perforación se inicia utilizando un fluido de perforación, que puede ser agua, lodo o una mezcla de ambos. Este fluido enfría la broca, transporta los recortes de roca a la superficie y ayuda a mantener la presión en el pozo. Durante la perforación, se monitorean parámetros como la presión, la temperatura y la tasa de penetración para optimizar el proceso. Para asegurar un control y monitoreo eficientes se utilizan:
 - **Sistema de Control de Perforación:** Conjunto de instrumentos y software que registran datos en tiempo real y permiten ajustes en la operación para optimizar el rendimiento.
 - **Equipos de Monitoreo:** Sensores y dispositivos que miden parámetros como temperatura, presión y flujo, proporcionando información crítica sobre las condiciones del pozo y el rendimiento del equipo.
- **Recolección de Muestras y Monitoreo:** A medida que se perfora, se recolectan muestras de roca y fluidos del subsuelo. Estas muestras se analizan para determinar la composición geológica, la temperatura y la presión del recurso geotérmico. Herramientas de monitoreo registran datos en tiempo real, permitiendo ajustes en las operaciones según sea necesario.
- **Evaluación de Recursos:** Una vez alcanzada la profundidad deseada, se evalúa el pozo para determinar su potencial geotérmico. Esto incluye pruebas de producción, donde se extraen fluidos para medir la temperatura y la capacidad de flujo. Los resultados de estas pruebas ayudan a decidir si el sitio es viable para el desarrollo de un proyecto geotérmico [22].

Las técnicas de exploración geotérmica comparten similitudes, especialmente en la identificación de zonas rocosas con alta concentración de calor y permeabilidad. A continuación, se presenta una comparación y evaluación de tres técnicas específicas.

4.2.1.3 *Métodos geofísicos*

Esta técnica se relaciona la anterior, ya que habla de exploraciones geofísicas para recolección de datos, que consisten en perforación y obtención de muestras para posteriormente ser analizadas. Esta técnica permite estudiar las propiedades físicas del subsuelo. Esta técnica utiliza diferentes procesos [23]:

- Resistividad eléctrica: Mide la resistencia del terreno a la corriente eléctrica. Se inyecta corriente en el suelo y se mide el voltaje en varios puntos para identificar zonas con alta conductividad, que pueden indicar la presencia de agua caliente.
- Resistividad sísmica: Empleada para determinar la estructura geológica del subsuelo. Se generan ondas sísmicas que viajan a través de las rocas y se registran sus reflexiones para crear un perfil del subsuelo.
- Métodos geológicos: Implican el estudio de las formaciones rocosas y su historia. Se analizan muestras de roca y se evalúan características como fracturas y alteraciones minerales que pueden indicar actividad geotérmica.
- Métodos geoquímicos: Consisten en el análisis de gases y aguas termales. Se recolectan muestras de agua y gases en superficie para determinar su composición química, lo que ayuda a identificar la temperatura y la naturaleza del sistema geotérmico.
- Perforación exploratoria: Se realizan perforaciones para obtener muestras directas del subsuelo. Esto permite evaluar la temperatura y la presión a diferentes profundidades, así como la composición de los fluidos geotérmicos.
- Las operaciones de exploración se llevan a cabo a través de proyectos geológicos enfocados en la perforación de pozos. Estos proyectos se basan en la evaluación de recursos geotérmicos y la selección de acuíferos adecuados, anticipando el uso del acuífero del

Triásico Inferior a una profundidad de aproximadamente 1500 a 1750 metros bajo el nivel del suelo. Para establecer las condiciones de la fuente de calor geotérmico se determinan parámetros como la temperatura y el caudal del agua geotérmica. La perforación se realiza utilizando un método rotativo convencional con rodillo o broca de corte, empleando diámetros de perforación específicos para cada sección del pozo [20].

4.2.1.4 Esfera de Granito Lipnice

Se utiliza una muestra esférica de granito para realizar mediciones de velocidad de propagación de ondas en el laboratorio. Esta forma esférica permite evaluar de manera continua cómo se distribuye la velocidad de propagación dentro del material estudiado. Este método elimina posibles errores que podrían surgir de suposiciones previas y facilita el análisis de la evolución de la anisotropía elástica con la profundidad. Además, permite estudiar su relación con la estructura de la roca y la microporosidad. Las condiciones de presión aplicadas simulan profundidades de hasta 10 km, lo que incluye las profundidades típicas en las que se prevén aplicaciones de ingeniería, como repositorios de desechos radiactivos o sistemas geotérmicos mejorados. [42].

4.2.1.5 Sistema geotérmico de pluma de CO₂

Realiza una fase de exploración para delinear las formaciones geológicas adecuadas para la extracción de calor y la inyección de CO₂ [43]. Esto implica la realización de una encuesta sísmica en 3D para explorar y delinear posibles prospectos. Además, se realiza un modelado geológico regional en 3D de las estructuras y se lleva a cabo una modelización hidrogeológica. También se realiza una simulación numérica del flujo de fluidos y la transferencia de calor. Estos pasos ayudan a evaluar la viabilidad del sistema CPG y del modelo propuesto.

Una vez completada la fase de exploración, se lleva a cabo la perforación de pozos geotérmicos. El costo de perforación de un pozo geotérmico de 3000 m se estima en 5.8 millones

de dólares. Después de la perforación, se realiza una simulación del yacimiento para evaluar su capacidad de producción y se determina la cantidad de CO₂ que se puede inyectar y almacenar en el yacimiento [43].

4.2.1.6 Modelo de temperatura geoestadístico 3D

El modelo se basa en datos obtenidos de pozos en toda la cuenca y genera mapas probabilísticos de isotermas, que son líneas que conectan puntos con la misma temperatura. Estos mapas son herramientas fundamentales para determinar la temperatura en un sitio específico, a profundidades donde se espera que alcance 70°C o 140°C. Este modelo destaca una serie de anomalías térmicas, tanto positivas como negativas, que se interpretan como resultado del calor generado por la circulación de fluidos a lo largo de fallas y sistemas kársticos (sumideros). Esta técnica es útil para identificar el potencial de recursos geotérmicos. [44].

4.2.1.7 Modelamiento de los espacios geotérmicos aprovechables

Consiste en la simulación de corrientes de flujo. Este modelo tiene en cuenta la ubicación y las tasas de flujo de los inyectores en la zona de falla de alta conductividad que suministra el fluido geotérmico a la planta de energía. Se utilizan pruebas de trazadores para calibrar las soluciones de flujo del modelo y predecir las concentraciones de trazadores en los productores. Además, se asume la ausencia de cualquier distorsión en el patrón de flujo que pueda surgir de un flujo de campo lejano desconocido o de otras deflexiones estructurales [49].

4.2.1.8 Método Electromagnético de Exploración Aérea (SAEM)

Las operaciones de exploración en SAEM involucran el uso de un transmisor de alta potencia, receptores aéreos y UAV para recopilar datos electromagnéticos. Estos datos se procesan y se lleva a cabo una inversión unidimensional para obtener información sobre la estructura subterránea.

El documento [51] explica de que el estudio previo para obtener datos para la exploración geotérmica se desplegaron 12 líneas de estudio con una longitud de línea de 3 km y un espaciado de línea de 200 m. Se utilizó un cable de tierra como antena transmisora, con una distancia entre polos de 2.7 km. Se realizaron observaciones de tres componentes utilizando un magnetómetro inductivo. Los datos se procesaron y se llevó a cabo una inversión unidimensional para obtener el perfil de inversión de cada perfil de estudio.

4.2.2 Costo de los equipos de excavación

De los 58 documentos revisados, solo tres incluyen información sobre costos relacionados con la perforación, lo que equivale a un 5.17% del total. La mayor parte de los datos monetarios asociados a la perforación y equipos proviene del Valor por Capacidad Instalada, que representa el 3.44%. Por otro lado, el Costo Total de Perforación constituye el 1.72%. Ambos conceptos están conectados, ya que para calcular el costo de perforación se utiliza una fórmula que determina la inversión inicial, facilitando así el análisis económico del proyecto.

Los datos extraídos de las fuentes analizadas y se presentan en la tabla 3, es importante destacar que la diferencia entre estos dos métodos es que mientras el Valor por Capacidad Instalada se calcula en función de la capacidad de generación prevista y el Costo Total de Perforación se establece en base a la distancia.

Tabla 3 Costos de equipos de excavación

N	Costo equipos de excavación	Fuente	%
1	Valor por Capacidad Instalada	[19][46]	3.44
2	Costo total de Perforación	[46]	1.72
3	Evaluación técnico-económica	[52]	1.72

Para los costos se tiene en cuenta un primer factor encontrado en el artículos [19], este habla sobre el valor por capacidad instalada, se comprende que entre más capacidad de generación más alto el costo de equipos. La exploración geotérmica utiliza el mismo equipo que la exploración de hidrocarburos, por lo que el costo varía según los estratos geológicos y la profundidad de la investigación.

El costo inicial de inversión relacionado con la instalación de equipos es proporcional a la capacidad de potencia instalada de la planta. Gracias a las economías de escala, el costo de capital unitario disminuye exponencialmente a medida que aumenta la capacidad de energía. Sin embargo, este costo también depende de la técnica empleada en la planta geotérmica y puede aumentar significativamente para sistemas complejos. “Se observa una variación en el costo de capital unitario desde 2000 dólares por cada kW instalado para una planta de 5 MW y hasta 1000 dólares por cada kW para una planta de 150 MW” [19].

De lo anterior se entiende que a mayor capacidad instalada de generación los equipos son más económicos la relación entre la capacidad de generación y el valor de equipos se calcula con la siguiente ecuación:

Formula Costos de equipos de superficie:

$$C_{surf} = C_{exp} + 2000 * Pt \quad (3)$$

Donde:

C_{surf}: Costo de equipos de superficie (\$)

C_{exp}: Costo de exploración (\$)

Pt: Capacidad promedio de la central eléctrica (MW)

La relación entre los artículos de [19] y [46] tiene la necesidad de conocer la distancia de perforación del sitio destinado para una central geotérmica, y con ese valor numérico, aplicar una

fórmula para calcular el costo de perforación, obteniendo así un valor más exacto para la inversión.

La perforación incluye el valor de los equipos, generando un valor global de todo lo realizado. El costo de perforación representa una gran proporción del Cdrill (costo total de perforación) para pozos, el costo total de perforación se puede calcular utilizando una fórmula específica que toma en cuenta diversos factores del sitio y los equipos empleados [46].

Formula Costo de Perforación por Longitud:

$$C_{drill} = \frac{(H_V * P_V + H_h * P_h)}{10^6} \quad (4)$$

Donde:

C_{drill} : es el costo total de perforación, M yuan chino\$

H_V : longitud del pozo vertical en metros

H_h : longitud del pozo horizontal en metros

P_V : costos unitarios de perforación del pozo vertical

P_h : pozo horizontal, respectivamente, yuan chino\$ por cada metro

El referente [46] corresponde a una implementación en Zhacang en el año 2022. El costo total de excavación es de 8.28 M\$ de yuan chino que en dólares es 1,17 M\$. Este costo incluye la perforación de pozos verticales y horizontales, con longitudes de 8800 m y 2000 m respectivamente, y costos unitarios de perforación de 600 yuan chino \$/m y en dólares son unos 84,32 \$/m y 1500 yuan chino \$/m y en dólares 210,80 \$/m para pozos verticales y horizontales respectivamente.

La evaluación técnico-económica encontrada en el artículo [52] habla sobre el uso de energía geotérmica para calentar agua de bebida para ganado. Los costos de retrofitización de pozos inactivos sugieren que transformar un pozo suspendido es considerablemente más

económico, con un ahorro estimado de aproximadamente \$37.022,65 dólares en comparación con un pozo abandonado. La variación en los costos para el retrofit (reutilizados) de pozos suspendidos es mínima, generalmente menos de \$8.144,98 dólares.

Por otro lado, los gastos asociados a la distancia entre el pozo y el usuario, junto con los materiales necesarios para transportar agua caliente, pueden significar una diferencia de más de \$8.8854,36 dólares por pozo. Este factor resalta la importancia de la ubicación y la logística en los proyectos geotérmicos.

Desde una perspectiva económica, el análisis se basa en datos históricos de costos de perforación en la industria del petróleo y gas de la región, el potencial para aprovechar la infraestructura existente para implementar soluciones geotérmicas. Esta estrategia no solo podría reducir significativamente los costos iniciales, sino también contribuir a la sostenibilidad económica y ambiental de las operaciones.

4.2.3 Capacidad de generación

De los 58 documentos analizados, 10 de ellos (17.24%) tienen información importante sobre la generación, entre estos se menciona los países con Capacidad Instalada de Generación Geotérmica en Diferentes Países que contribuye con el 20.68% de información similar.

La importancia de los datos encontrados radica en conocer la capacidad de generación de energía en distintos países y su potencial para la producción de electricidad mediante sistemas de geotermia.

La Tabla 4 presenta los diferentes métodos utilizados para la generación de energía en diversas partes del mundo. Esta información permite identificar los valores de generación y relacionar los artículos que presentan similitudes.

Tabla 4 Capacidad de Generación

N	Generación Geotérmica	Fuente	%
1	Métodos de Cálculo de Generación	[19][29]	3.44
2	Capacidad de Generación de Colombia	[14]	1.72
3	Comparación de Generación Geotérmica	[23][53]	3.44
4	Capacidad Instalada de Generación Geotérmica en Diferentes Países	[28][32][37][40][43][46][52][54][55][56][57][58]	20.68
5	Generación para calefacción	[20]	1.72
6	Optimización para la Generación Geotérmica	[59]	1.72
7	Socialización Global de la Energía Geotérmica.	[60]	1.72

En el artículo [19] se utiliza una forma de cálculo de generación la cual utiliza fórmulas, para este método se debe tener algunos valores encontrados en la durante la exploración inicial para la planta, la forma de calcular la generación se realiza de la siguiente manera:

Capacidad Térmica (Wh): Para calcular el potencial de generación de energía de un sistema geotérmico, se utilizan la siguiente fórmula:

Producción de Calor (H):

$$H = q(h_o - h_i) \quad (5)$$

Donde:

H: la energía térmica producida (en J)

q: la tasa de producción del fluido (en kg/s)

h_o: la entalpía del fluido geotérmico producido (en $\frac{J}{kg}$)

h_i: la entalpía del agua reintegrada (en J/kg)

Conversión a Electricidad (We): La energía térmica generada se transforma en electricidad mediante una planta geotérmica, la fórmula utilizada es:

Potencia eléctrica (W_e):

$$W_e = \eta W_h \quad (6)$$

Donde:

W_e : la potencia eléctrica generada en W (vatios)

η : la eficiencia del sistema de conversión

(generalmente, menos del 10% en plantas de baja temperatura)

W_h : es la potencia térmica producida (en W)

4.2.3.1 Factores que Afectan la Generación de Energía Geotérmica [19]

- **Tasa de Flujo:** El incremento en la tasa de flujo del fluido geotérmico resulta en una mayor capacidad de generación de energía. Por ejemplo, flujos de 48 L/s, 96 L/s y 144 L/s presentan distintas capacidades de generación.
- **Temperatura y Presión:** Fluidos con mayor temperatura y presión permiten una eficiencia y producción de energía superiores.
- **Eficiencia:** La eficiencia de las turbinas y generadores determina cuánta energía térmica se convierte efectivamente en energía eléctrica.
- **Producción Cumulativa:** La producción de energía se calcula a lo largo del tiempo, considerando la disponibilidad de la planta (generalmente en torno al 90%) y sumando la generación acumulativa para diferentes tasas de flujo y condiciones de operación. Esto proporciona un valor total de generación de energía a lo largo de un período, como 30 años de operación.
- **Ejemplo Práctico:** para un sistema con un flujo de 144 L/s: Se estima que la energía acumulada al final de 30 años puede alcanzar aproximadamente 1200 GWh con una planta operando a un 90% de disponibilidad. Esto se traduce en una capacidad efectiva de

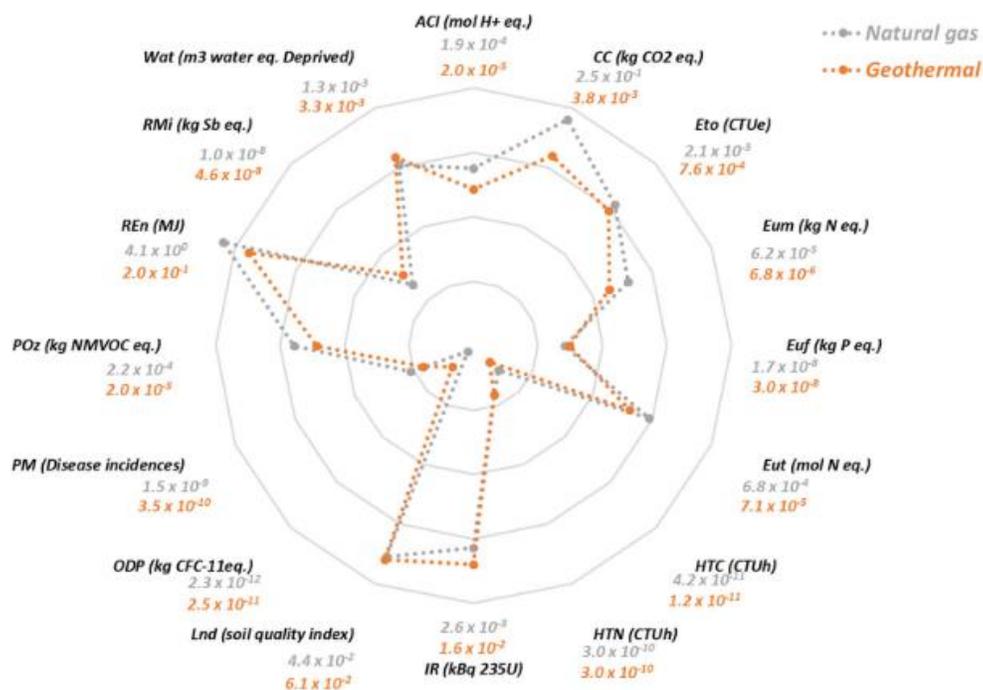
generación anual, que puede evaluarse utilizando las fórmulas mencionadas anteriormente para determinar la contribución económica y energética del proyecto geotérmico.

En el artículo analizado [14], se encuentra información de cuál sería la capacidad de generación de Colombia evaluando el recurso geotérmico, este fue evaluado por el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL). El objetivo era encontrar los lugares con mayor potencial para el desarrollo de la energía geotérmica en un área de aproximadamente 100.000 km². El estudio se concentró en la cordillera oriental, que también mostró signos de actividad volcánica reciente junto con manantiales termales de alta temperatura, y las cordilleras central y occidental, que se distinguen por actividad volcánica reciente y la presencia de dichos manantiales.

Estos estudios demostraron que Colombia tiene regiones con potencial para producir hasta 1000 MW de energía geotérmica. Estimaciones posteriores, realizadas por Liz Battocletti en 1999, indicaron que Colombia podría tener 2210 MW de potencia geotérmica en lugares como Santa Rosa de Cabal, el Complejo Ruiz, Paipa, el Volcán Azufral, Chiles, Cumbal, Cerro Negro y Tufiño.

Para lograr este objetivo con la energía geotérmica como una alternativa factible, se pretende que para 2025 se generarán al menos 1.400 GWh de energía eléctrica anual mediante fuentes geotérmicas, lo que representa el 1,65% de la demanda total estimada de energía eléctrica en Colombia. En 2025, la capacidad de generación podría alcanzar los 17.400 GWh anuales, otro dato que representa el 20% de la demanda del país, si se aprovecha todo el potencial evaluado.

En el artículo [23] se realiza una comparación entre otras fuentes de generación que tiene Europa, la capacidad instalada de la planta de energía geotérmica de Rittershoffen es de 27 MWth (megavatios térmicos). Esto se menciona en la Figura 10, que compara la producción de 1 kWh de la fuente de calor más común en Europa (gas natural) con la producción de 1 kWh de la planta de energía geotérmica de Rittershoffen.

Figura 10 Comparación Geotérmica con otras fuentes de Generación [23]

El artículo [54] contiene valores de generación de diferentes plantas geotérmica en el mundo, con estos datos se responde a la capacidad de generación de estas plantas y su potencial geotérmico aprovechado en diferentes lugares del mundo, se replicó la tabla del artículo mencionado anteriormente:

Tabla 5 Generación Instalada 1995-2020 [54]

País	Capacidad instalada (MWt)
China	40,610
Estados Unidos	20,713
Suecia	6,680
Alemania	4,806
Turquía	3,488
Francia	2,597
Japón	2,570
Islandia	2,373
Finlandia	2,300
Suiza	2,197

El artículo [20], cuenta con una capacidad de generación de 19 megavatios para calefacción. En 2019 produjo aproximadamente 22 MWh de energía situada en el centro-oeste de Polonia, con el invierno siendo el periodo de mayor demanda. La potencia nominal del sistema de bomba de calor es de 3.087 MW, lo que representa el 23% de la potencia requerida por los usuarios finales. Aunque la potencia solicitada a la instalación es considerablemente inferior a su capacidad real, debido a la moderna distribución de la producción de energía, esta es capaz de suministrar el 72,4% de la producción anual total.

El análisis del artículo [59] concluye que la mejor estrategia es construir una planta de energía con una capacidad de 61 MW y operarla a plena capacidad durante los primeros 11 años, añadiendo continuamente pozos de reposición para mantener la producción total. Dado un conocimiento perfecto de las propiedades del yacimiento y precios futuros constantes de la energía, el algoritmo no contempla en ningún momento la expansión de la capacidad de producción. Después de 11 años, la adición de nuevos pozos deja de ser económicamente viable, lo que provoca una reducción significativa en la producción hasta alcanzar un estado de equilibrio alrededor del año 40, con una tasa de producción en equilibrio de aproximadamente 25 MW, es decir, menos de la mitad de la producción máxima inicial.

En el documento [60] se estima que para el año 2050, la energía geotérmica podría contribuir alrededor del 3,5% de la producción mundial de electricidad, o alrededor de 1.400 TWh al año. Esta capacidad de generación ayudaría a ahorrar la emisión anual de más de 800 millones de toneladas de CO₂.

4.2.4 Costo de la energía

De los 58 documentos analizados, 13 detallan cual es el costo de la energía generada por una planta geotérmica, esto representa el 22.41% de artículos con información relevante. Se encuentran más información de los costos de diferentes países con un 12.06% de documentos que se menciona la misma información, seguida por el costo nivelado de la electricidad la cual se obtiene por formulas, esto representa el 5.17% de los documentos con información importante para responder la pregunta de investigación.

La tabla 6 muestra la información recolectada de diferentes formas de obtener el costo de la energía, se incluye en la tabla las referencias de donde se obtiene las formas de obtener el valor de la energía.

Tabla 6 Costo de la generación eléctrica

N	Costo de la energía	Fuentes	%
1	Cálculo a través de Simuladores	[61]	1.72
2	Costo Nivelado de Electricidad	[19][46][59]	5.17
3	Costo de la Energía al Pasar los Años	[30][54]	3.44
4	Costo en Diferentes Países	[31][32][34][36][37][55][62]	12.06

La primea forma de calcular el costo de la energía [61], se realiza a través de un simulador avanzado en sistema de fracturación múltiple es eficiente y optimiza la producción de energía en una instalación innovadora de Sistema Geotérmico Mejorado (EGS), gracias a los simuladores numéricos FLAC3Dplus y TOUGH2MP-TMVOC.

El costo nivelado de energía (LCOE) para el escenario mejor optimizado, estimado por el software, es de 5,46 centavos de dólar por kWh. Este valor se determina a través de un análisis económico que considera diversos factores de costos y se basa en referencias a múltiples

investigaciones relacionadas, lo que resulta en una opción bastante económica. Para la siguiente forma de calcular Costo Nivelado de Electricidad (LCOE), [19] se tiene en cuenta varios parámetros que se menciona en la fórmula establecida en el documento es un estudio sobre un sistema geotérmico mejorado (EGS) estimó el LCOE la siguiente forma de calcular:

Fórmula de LCOE:

$$LCOE = \frac{\text{Costo Total}(\text{Primera fase} + \text{Segunda fase} + \text{Operacion y Mantenimiento})}{\text{Total de Generación}} \quad (7)$$

Donde:

Primera fase: Costo de exploración

Segunda fase: Costo de excavaciones

Operacion y Mantenimiento: Costos de manejo de personal

Total de Generación: Potencia de Generación

Para el artículo [54] el costo de la energía geotérmica se considera inicialmente alto debido a los gastos asociados con la exploración, perforación de pozos, construcción de tuberías y plantas. Sin embargo, a largo plazo, el costo de la energía geotérmica es bajo en comparación con otras fuentes de energía, esta capacidad produjo 38,035 GWh de energía eléctrica en 1995 y creció a 95,098 GWh en 2020. Donde se aprecia un incremento que triplica el valor de generación eléctrica inicial.

Tabla 7. Costos de generación por kWh

N	Referencia	Costo en (dólares) kWh
1	[61]	5,46 centavo de dólar
2	[55]	0,27 centavos de dólar
3	[46]	0.0413 centavos de dólar
4	[34]	0.03 - 0.15 centavos de dólar
5	[36]	0.019 centavos de dólar

Se toma en cuenta esta referencia ya que en diferentes documentos se menciona un precio, pero no como obtener ese valor, por ejemplo:

Es importante mencionar que en el artículo [55] la producción de energía geotérmica no es viable económicamente sin el apoyo de la Ley de Energía Alemana (EEG) lo que implica que la producción eléctrica es más viable de fuentes petroleras gracias a las tarifas más bajas garantizadas para los productores de electricidad renovable. Actualmente, los operadores de plantas geotérmicas reciben 0,25 euros por kWh y sería unos 0,27 centavos de dólar. A pesar de esto, no existen proyectos puramente petrotermales en Alemania, aunque la electricidad generada a través de métodos petrotermales se valora en 0,30 euros por kWh y sería unos 0,33 centavos de dólar. El gobierno planeó revisar la EEG el 1 de agosto de 2014, con la intención de eliminar el incentivo petrotermal de 0,05 euros por kWh en dólares es 0,055 centavos, introducir la comercialización directa obligatoria para los operadores. El inicio de la comercialización directa se determinará según la capacidad instalada de las plantas. Se establecerán períodos de adaptación más largos para las instalaciones más pequeñas con capacidades inferiores a 500 kW.

El artículo [30] ofrece un pronóstico de generación que abarca una secuencia de más de 10 años, estimando que el valor de venta de la electricidad disminuirá con el tiempo. Se analizan los costos de diferentes tecnologías de energía geotérmica, presentando los costos de capital en términos de CAPEX (gasto de capital) en dólares por kilovatio (kW) para diversas tecnologías y distintos años, esto se observa en la tabla 8.

Tabla 8. Costos de generación eléctrica Geotérmica de 2010 a 2050 [30]

Tecnología	CAPEX [\$/kW](dólar)				
	2010	2020	2030	2040	2050
Flash	4000	3800	3420	3249	3087
Binary	6000	3900	3510	3335	3168
EGS (existing)	8000	5200	3640	3494	3372
EGS (future, low cost)	10400	6760	4732	4543	4384
EGS (future, med cost)	12000	7800	5460	5242	5058
EGS (future, high cost)	14400	9360	6552	6290	6070

4.2.5 Costo de la inversión

De los 58 artículos analizados, 18 documentos únicos que detallan los costos de inversión representan el 31.03% del total revisado. El costo más comúnmente encontrado en estos artículos es la estimación del costo total de inversión en proyectos geotérmicos. Las fuentes que emplean esta metodología para obtener valores de inversión representan un 17.24% del total, ya que utilizan de manera repetitiva el mismo enfoque para estimar los costos, considerando factores como la potencia a generar y la máxima producción de electricidad.

En la tabla 9 se muestran las diversas formas de obtener valores de inversión y se encuentran las múltiples fuentes obtenidas de las bases de datos especializadas

Tabla 9 Costo de inversión

N	Inversión	Fuente	%
1	Variabilidad De Costos En Plantas Geotérmicas	[24][30][34][35][43][49][52][54][55][62]	17.24
2	Impacto De Operación Y Mantenimiento En La Inversión	[20][34][37][38][54][63]	10.34
3	Necesidad De Análisis Detallado En Inversiones Renovables	[20][38][52][55][62][63]	10.34
4	Estimación Del Costo Total De Inversión En Proyecto Geotérmico	[19][25][30][37][43][46][49][14]	13.79

5	Costos Específicos De Plantas Geotérmicas: Vapor Flash, Binaria Y De Contrapresión	[24][25]	3.44
6	Rango De Costos De Inversión En Plantas Geotérmicas: \$3000 A Más De \$6500 Por KW	[14][19][34]	5.17

El artículo [19] informa que la inversión para una planta geotérmica de 20 MW se estima en 39 millones de dólares, con un enfoque particular en los costos de perforación, estimulación, registro y exploración. En un análisis similar, se estima que el costo total de inversión para un proyecto geotérmico es de \$29.45 millones de dólares, incluyendo los mismos componentes. Además, se menciona que este costo puede variar significativamente según la ubicación del proyecto y otros factores específicos del sitio. Por tanto, aunque se citan diferentes cifras en euros y dólares, ambos estudios coinciden en la importancia de los procesos técnicos en la determinación del costo total de la inversión para plantas geotérmicas.

El costo de la inversión para las plantas de energía geotérmica varía según el tipo de planta. Según el artículo [25], el costo de una planta de vapor flash de 5 MW se estima en 1700 dólares por cada kW. Para una planta de energía binaria, el costo de capital se considera un 34.85% más alto que el de la planta de vapor flash. Por otro lado, el costo de una planta de energía de contrapresión se considera de 1500 dólares por cada kW para una planta de 5 MW.

Las plantas geotérmicas en el artículo [34], depende de múltiples factores como el tipo de recurso hidrotermal, la tecnología empleada, y la profundidad de los pozos. Los costos de inversión para estas plantas pueden variar considerablemente, oscilando entre \$3,000 dólares y más de \$6,500 dólares por kW. Este rango depende de la temperatura del recurso utilizado, siendo las plantas que aprovechan recursos de alta temperatura generalmente menos costosas que aquellas que operan con recursos de baja temperatura. Además, los costos de operación y

mantenimiento, junto con la estructura de financiamiento del proyecto, influyen significativamente en el costo nivelado de la electricidad producida, que puede variar entre 3 y 15 centavos de dólar por kWh.

En el proyecto [35], como el caso de una estación de energía geotérmica supercrítica en el campo geotérmico de Reykjanes, el costo de inversión total se estima en 72 millones de dólares. Este monto incluye aspectos como la reconstrucción del yacimiento geotérmico, la instalación de equipos de generación de energía en la superficie, y los costos de operación y mantenimiento, destacándose estos últimos como los principales factores que impactan en el costo total.

Tabla 10. Costo de inversión

N	Referencia	Costo en (dólares)	Generación
1	[19]	39 millones	20 MW
2	[25]	1700	5 MW
3	[34]	3000 - 6500	Por cada kW
4	[30]	500 billones	3300 – 3800 TWh
5	[43]	1093,19	20 – 60 MW

4.2.6 *La eficiencia que tienen este tipo de proyectos*

De los 58 documentos analizados, ocho detallan como se puede obtener un pronóstico de eficiencia según la planta de geotermia que se emplea, esto corresponde al 13.79% de los artículos. Se menciona que la planta tipo binaria tiene más eficiencia que el tipo flash y finalmente, la eficiencia según la turbina de generación que corresponde al 6.89% de información recolectada.

La tabla 11 muestra diversas formas de obtener la eficiencia en estos proyectos, se identificaron tres formas distintas, cada una apoyada por sus fuentes como se indica a continuación.

Tabla 11 Eficiencia Para Generación Geotérmica

N	Eficiencia Según Equipos Utilizados	Fuente	%
1	Eficiencia Según Planta De Generación Tipo Binaria o Flash	[24][29][40][48][54]	8.62
2	Eficiencia Según Tipo De Perforación Drill String, Bit Balling y Back Pressure	[17][22]	1.72
3	Eficiencia Según Turbina De Generación	[20][29][40][17]	6.89

La eficiencia de los proyectos de energía geotérmica de ciclo binario [24] depende significativamente de la configuración del ciclo y del fluido de trabajo empleado. Diversos ciclos, como el ciclo de doble ebullición y el ciclo trilateral, están diseñados para mejorar la eficiencia según la segunda ley de la termodinámica, reduciendo las pérdidas energéticas durante los procesos de transferencia de calor. En particular, el uso de fluidos de trabajo mixtos, como la mezcla de amoníaco y agua en el ciclo Kalina, es efectivo para disminuir la irreversibilidad en el intercambio de calor.

Estudios comparativos sobre la eficiencia de conversión de segunda ley y la generación neta de energía entre diferentes configuraciones de ciclo han arrojado resultados reveladores. Por ejemplo, el ciclo de doble ebullición puede incrementar la potencia neta en aproximadamente un 16% en comparación con el ciclo básico de energía binaria. Asimismo, tanto el ciclo supercrítico como el ciclo supercrítico con una mezcla pueden aumentar la potencia neta en aproximadamente un 26% y un 33%, respectivamente. Aunque estos resultados son preliminares y no optimizados,

ofrecen una visión clara de cómo cada configuración de ciclo influye en la eficiencia de conversión y en la generación neta de energía.

Es fundamental considerar que la elección del fluido de trabajo y el diseño general de las plantas de energía binaria están sujetos a códigos y normas de ingeniería, además de las directrices establecidas por agencias regulatorias. Estas regulaciones juegan un papel crucial en la viabilidad y seguridad de los proyectos, asegurando que las plantas operen dentro de los parámetros técnicos y legales establecidos.

La eficiencia de los proyectos de energía geotérmica no solo depende de factores como la configuración de los pozos [17], la permeabilidad de las fallas y el flujo de fluido, sino también de las técnicas de perforación empleadas, como la Drill String, Bit Balling, y el Back Pressure. Estas técnicas juegan un papel crucial en la optimización del proceso de extracción.

- **Perforación Drill String:** Este método se refiere al uso de una serie de tubos conectados que transmiten el movimiento rotatorio y la fuerza desde la superficie hasta la broca en el fondo del pozo. Una correcta configuración y operación de la Drill String es esencial para mantener la integridad del pozo, evitar colapsos y maximizar la eficiencia de perforación. Esto asegura que la perforación alcance las capas geotérmicas de manera eficiente, lo que contribuye a una mayor recuperación de calor y, en última instancia, a una extracción más eficiente de energía.
- **Bit Balling:** Este fenómeno ocurre cuando el material perforado se adhiere a la broca, formando una bola que reduce la efectividad de la perforación. La acumulación de material puede reducir la velocidad de perforación y aumentar los costos operativos. Sin embargo, el manejo adecuado del fluido de perforación y la selección de la broca correcta pueden

mitigar este problema, asegurando que la perforación continúe de manera eficiente y que se minimicen las interrupciones en el proceso.

- **Back Pressure:** El control de la presión de retorno (Back Pressure) es esencial para mantener la estabilidad del pozo durante la perforación. Esta técnica ayuda a evitar el colapso del pozo y la entrada de fluidos indeseados, lo que podría comprometer la integridad de la operación. Un control adecuado del Back Pressure contribuye a mantener un flujo constante de fluidos geotérmicos, optimizando así la extracción de energía.

Al combinar estas técnicas de perforación con estrategias de circulación hacia abajo y la utilización de conductos permeables preexistentes, se puede maximizar la eficiencia en la recuperación de calor y minimizar los riesgos asociados, como la sismicidad y la inyección en fallas. Estos factores, en conjunto, mejoran la viabilidad a largo plazo de los proyectos geotérmicos, asegurando un rendimiento óptimo y sostenible. En este contexto, la siguiente fórmula es fundamental para calcular la eficiencia en función del calor térmico recuperado:

Formula de Carnot

$$E = \frac{T_H - T_C}{T_H} * 100\% \quad (8)$$

Donde:

E: eficiencia

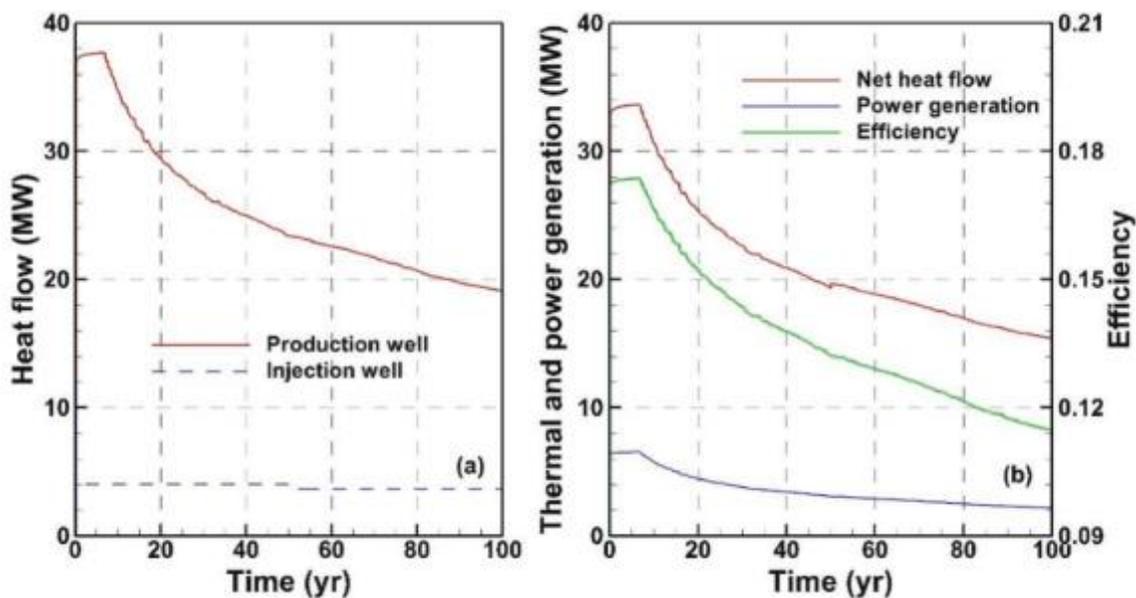
T_H: Temperatura en operación (caliente)

T_C: Temperatura en reposo (estado estatico)

Esta fórmula permite evaluar cómo las técnicas de perforación y la configuración de los pozos influyen en la eficiencia energética, proporcionando una herramienta clave para optimizar el diseño y la operación de los proyectos geotérmicos.

La figura 11 muestra la eficiencia de una planta de generación eléctrica de geotermia, esta planta es tipo Flash considerada una de las más eficientes por su poco tiempo de duración en el proceso de producción, al inicio de generación tiene un valor de 34MWh un valor grande para sostener una ciudad completa después de 100 años su eficiencia disminuye por el deterioro del yacimiento de calor térmico bajando su producción a 16MW, se entiende que la generación eléctrica con este sistema es muy sostenible ya que al pasar 100 años su producción sigue siendo alta [29].

Figura 11. Evolución temporal del flujo de calor (a), generación térmica y eléctrica, y eficiencia de conversión (b), [29].



5. Discusión de resultados

Este capítulo se centra en responder a las preguntas de investigación planteadas y analiza los principales resultados de una revisión sistemática de la literatura sobre proyectos energéticos basados en energía geotérmica. Los documentos revisados, que se extrajeron de bases de datos como Scopus e IEEE Xplore, se organizaron en una matriz de clasificación. Esta matriz ayudó a organizar la información según los elementos pertinentes de cada estudio, como las técnicas utilizadas, los costos de inversión y los costos de generación.

La matriz de clasificación permitió un análisis exhaustivo y agrupó los resultados según las preguntas de investigación. Para cada pregunta planteada, se encontraron las respuestas más frecuentes en los documentos revisados y se consideraron los puntos más importantes o más relevantes en la literatura. Este método ayudó a resaltar las áreas de consenso y las tendencias predominantes en la energía geotérmica.

La revisión ha encontrado que el uso de técnicas de exploración en los proyectos geotérmicos es un hallazgo común. La mayoría de los artículos analizados enfatizan las técnicas de perforación y exploración como componentes clave. En particular, se observa que la perforación geotérmica es el método más utilizado en los estudios, lo que indica un enfoque significativo en su optimización y desarrollo. La alta relevancia de este tema en los documentos demuestra que la precisión en la exploración y la selección de técnicas adecuadas son esenciales para el éxito de los proyectos geotérmicos.

Las técnicas de exploración geotérmica tienen tanto beneficios como inconvenientes. La Estimulación de Recursos Geotérmicos (EGS) permite aprovechar formaciones con baja permeabilidad, pero a costa de altos costos y la posibilidad de inducir sismos. Aunque la

perforación y la exploración geotérmica brindan datos directos, son costosas y pueden tener un impacto ambiental significativo.

Aunque su resolución es limitada, los métodos geofísicos ofrecen información sobre el subsuelo de manera no intrusiva. La Esfera de Granito Lipnice es más adecuada para estudios teóricos cuando se trata de medir la velocidad de ondas en condiciones de laboratorio. El sistema geotérmico de pluma de CO₂ optimiza la inyección de este gas, pero su implementación es costosa y complicada. Aunque el Modelo de Temperatura Geoestadístico 3D ayuda a encontrar recursos térmicos, no es preciso hasta que se obtengan datos de calidad. El modelamiento de espacios geotérmicos aprovechables también puede simular el flujo de fluidos, pero requiere muchos datos detallados y puede ser difícil de calibrar. Finalmente, el Método de Exploración Aérea Electromagnética (SAEM) permite cubrir grandes áreas sin perforar, pero tiene limitaciones en la resolución y requiere más datos para dar interpretaciones precisas.

Los documentos revisados carecen de información detallada sobre los costos de inversión, con solo el 5.17% de los artículos proporcionando datos específicos sobre los costos de equipos de excavación. Esta falta de información indica que la literatura carece de conocimiento sobre elementos cruciales como el costo total de la perforación y el valor de capacidad instalada, los cuales tienen un impacto directo en el costo de los equipos necesarios para la excavación. La identificación de una fórmula para calcular el costo de perforación fue un hallazgo relevante, ya que podría facilitar el análisis económico de los proyectos y ayudar a una mejor planificación financiera.

La precisión de los procesos de perforación y la fricción del pozo son dos de las múltiples medidas de eficiencia del proyecto, según el análisis de varios artículos. Este análisis encontró un patrón del ciclo de eficiencia que ayuda a optimizar el proceso de generación de energía. Este

método puede usarse para mejorar la gestión operativa y maximizar la eficiencia de la producción de energía geotérmica.

En el campo de la energía geotérmica, se han identificado tendencias clave, áreas de oportunidad y desafíos recurrentes a través de una revisión sistemática y un análisis de las respuestas a las preguntas de investigación. Los resultados destacan la importancia de las técnicas de exploración, así como la necesidad de obtener información más precisa sobre los costos de inversión y la optimización de la eficiencia de los proyectos. Estos hallazgos sirven como base sólida para futuras investigaciones y avances tecnológicos, que buscan fomentar una adopción más amplia y eficiente de esta fuente de energía renovable en todo el mundo.

Se indica que la energía de las olas oceánicas y la energía eólica marina tienen costos por kilovatio-hora (kWh) comparables, oscilando entre \$10 y \$15 centavos de dólar. El costo de la energía de las mareas varía de \$20 a \$50 centavos por kilovatio hora, dependiendo de la ubicación y la tecnología utilizada. El costo de la energía térmica oceánica es similar al de la energía eólica marina y las olas, y oscila entre \$10 y \$18 centavos por kilovatio hora. La energía geotérmica se destaca como una alternativa económica en comparación con otras fuentes, ya que tiene precios que van desde \$3 hasta \$15 centavos por kilovatio hora.

Tabla 12. Comparación de costos de producción de la energía renovable [34].

Fuente de producción	Costo de energía (\$)
Eólica Marina	\$10-15 kwh
Olas Oceánicas	\$10-15 kwh
Energía de las mareas varea el costo	\$50-20 kwh
Energía térmica oceánica	\$10-18 kwh
Energía geotérmica	\$3-15 kwh

Además, se menciona que se puede evaluar la eficiencia de los proyectos geotérmicos utilizando su capacidad para generar electricidad y su relación con la demanda total de electricidad del país. Se espera que una futura planta geotérmica en Colombia produzca al menos 1400 GWh de energía eléctrica anualmente para el año 2025, lo que representaría aproximadamente el 1.65% de la demanda total de energía del país. Según esto, la planta geotérmica podría ahorrar mucho dinero en la adquisición de energía de países cercanos y funcionar de manera segura sin interrupciones en el futuro.

Conclusiones

La revisión sistemática de literatura sobre proyectos energéticos basados en energía geotérmica ha consolidado una comprensión integral de los principales aspectos y tendencias en esta área. Los resultados indican áreas importantes de progreso y obstáculos que impactan la viabilidad y eficacia de las iniciativas geotérmicas.

En primer lugar, se destaca la relevancia de las técnicas de perforación y su buena exploración. La mayoría de los documentos estudiados coinciden en que la perforación geotérmica es la técnica fundamental la cual necesita una mejora constante. Esto dejan en claro la necesidad de seguir perfeccionando y estudiando las técnicas para lograr mejorar la eficiencia y reducir los costos.

En costos de la inversión se identifica que no existe mucha información sobre esta en los documentos, pero también se halló una formula útil para lograr calcular el costo de perforación, datos sobre costos totales de perforación y los equipos usados para la excavación siguen siendo limitados. Esta falta de información o respuestas puede sugerir estudios adicionales para obtener datos precisos y más completos así logrando una mejor estudio o planificación económica.

El análisis de la eficiencia en la generación de energía ha dado respuestas de su rendimiento, como la precisión en los procesos de perforación y la fricción en los pozos. Ha sido descubierto un modelo en el ciclo de eficiencia que puede utilizarse como una referencia para mejorar los procesos y aumentar la producción de energía. Este patrón sienta las bases firmes para el desarrollo de prácticas en la explotación de recursos geotérmicos que sean más eficientes y efectivas.

Por otra parte, a pesar de haberse observado una concentración de proyectos en regiones con alta actividad geotérmica como Islandia, Nueva Zelanda y ciertas áreas de los Estados

Unidos, se ha identificado un importante potencial en otras zonas menos exploradas. Es obvio que existe la necesidad de investigar y desarrollar proyectos en nuevas zonas geográficas, lo cual podría brindar oportunidades para una mayor adopción y expansión global de la energía geotérmica.

En resumen, la revisión sistemática brinda un panorama completo de los avances y obstáculos en el ámbito de la energía geotérmica. Es fundamental seguir mejorando la tecnología, solucionar las deficiencias en los datos económicos y buscar oportunidades en áreas geotérmicas inexploradas. Estos hallazgos sientan las bases para futuras investigaciones y avances tecnológicos, buscando fomentar la adopción de esta fuente de energía renovable a nivel mundial con mayor eficacia.

Recomendaciones

Se sugiere continuar con este tipo de proyectos de investigación basados en energía geotérmica para así tener mayor amplitud de información sobre este tipo de energía, considerando que es una gran alternativa para poder utilizarla como una fuente de generación dentro de la vida cotidiana, trayendo consigo beneficios a largo plazo.

Se propone incentivar a expertos en tema sobre energía geotérmica en este caso a ingenieros electrónicos para que puedan realizar estudios previos con la intención de obtener este tipo de energía ya que a nivel mundial es mucha la capacidad de suelos que existen para producirla.

Se recomienda hacer una planificación de manera muy cuidados al momento de investigar la documentación sobre la energía geotérmica ya que de esto depende que las personas interesadas en el tema puedan tener buenas bases para aplicar en campo este tipo de proyectos puesto que al trabajar con energía geotérmica tiene un alto riesgo.

Es de suma importancia motivar a la sociedad y dar a conocer el proceso de generación de energía geotérmica fomentando la participación activa, con la intención de que existan ideas más claras y efectivas, para formar un mundo con una energía sostenible.

Referencias

- [1] Keele S, “Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering,” *Tech. report, Ver. 2.3 EBSE Tech. Report. EBSE*, no. January 2007, 2007.
- [2] D. Carrizo and C. Moller, “Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 26, pp. 45–54, 2018, doi: 10.4067/s0718-33052018000500045.
- [3] Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador, “Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental,” 2013.
- [4] P. Bona and M. Coviello, “Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur,” *Com. Económica para América Lat. y el Caribe*, pp. 1–3, 2016, [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40079>
- [5] Programa de Ingeniería Electrónica, “Líneas de Investigación Programa de Ingeniería Electrónica,” Pasto, 2015.
- [6] M. Gehringer and V. Loksha, “Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad,” *Energy Sect. Manag. Assist. Progr.*, pp. 16–64, 2022.
- [7] Congreso de Colombia, “Ley 1715 de 2014,” *D. Of.*, p. 104, 2014.
- [8] Carlos Adrián Correa Flórez - Director General UPME, “Projected Electricity Demand and Maximum Power 2023-2037,” pp. 6–9, 2023, [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyeccion_demanda_2023-2037_VF2.pdf
- [9] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2023 | Enhanced Reader,” 2023, [Online]. Available: <https://www.iea.org/news/the-energy-world-is-set-to-change-significantly-by-2030-based-on-today-s-policy-settings-alone>

- [10] N. C. Marzolf, “Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia,” *Emprend. la energía geotérmica en Colomb.*, 2014, doi: 10.18235/0012683.
- [11] J. O. M. Bonilla, “Evaluación de factibilidad técnica para una planta geotérmica en paipaza, Boyacá,” pp. 5–24, 2023, [Online]. Available: http://repo.iain-tulungagung.ac.id/5510/5/BAB_2.pdf
- [12] J. Gonzáles, “Hacia la sustentabilidad social de proyectos geotérmicos en México,” pp. 1–178, 2016, [Online]. Available: <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-González-Troncoso-Jocelyn-Citlali.pdf>
- [13] O. Latinoamericana, B. Interamericano, and D. E. Desarrollo, *Guía Para Estudios De Reconocimiento Y Prefactibilidad Geotermicos Banco Interamericano De Desarrollo Organizacion Latinoamericana Deenergia*. 1994.
- [14] S. S. Salazar, Y. Muñoz, and A. Ospino, “Analysis of geothermal energy as an alternative source for electricity in Colombia,” *Geotherm. Energy*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s40517-017-0084-x.
- [15] C. Robilliard, “Proyectos empresariales industriales,” *Rev. Ing.*, pp. 158–205, 2009.
- [16] M. H. Dickson and M. Fanelli, “¿Qué es la Energía Geotérmica?,” *Int. Geotherm. Assoc.*, vol. 1, 2004, [Online]. Available: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/-que-es-la-energia-geotermica->
- [17] Q. Gan, Z. Feng, L. Zhou, H. Li, J. Liu, and D. Elsworth, “Down-dip circulation at the united downs deep geothermal power project maximizes heat recovery and minimizes seismicity,” *Geothermics*, vol. 96, no. July, p. 102204, 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102204.
- [18] S. S. S. Blanco, “Panorama Mundial de la Energía Geotérmica: Generación de

- electricidad,” pp. 1–4, 2016.
- [19] M. Haris, M. Z. Hou, W. Feng, F. Mehmood, and A. bin Saleem, “A regenerative Enhanced Geothermal System for heat and electricity production as well as energy storage,” *Renew. Energy*, vol. 197, no. February, pp. 342–358, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.107.
- [20] P. Jura, “Efficiency of a Compressor Heat Pump System in Different Cycle Designs : A Simulation Study for Low-Enthalpy Geothermal Resources,” 2022.
- [21] Y. Huang, L. Yang, C. Gao, Y. Jiang, and Y. Dong, “A novel prediction approach for short-term renewable energy consumption in china based on improved gaussian process regression,” *Energies*, vol. 12, no. 21, pp. 1–17, 2019, doi: 10.3390/en12214181.
- [22] H. Huang, C. Lu, S. Ma, and M. Wu, “Analysis of Coupled Axial-Torsional Drill-String Vibration Based on Fuzzy Bit-Rock Interaction Model Considering Bit Balling Condition,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 9, pp. 9833–9842, 2023, doi: 10.1109/TII.2022.3233664.
- [23] M. Douziech, L. Tosti, N. Ferrara, M. L. Parisi, P. Paula, and G. Ravier, “Applying Harmonised Geothermal Life Cycle Assessment Guidelines to the Rittershoffen Geothermal Heat Plant,” 2021.
- [24] G. Mines, *Binary geothermal energy conversion systems: Basic Rankine, dual-pressure, and dual-fluid cycles*. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100337-4.00013-9.
- [25] C. A. Córdova Geirdal, M. S. Gudjonsdottir, and P. Jensson, “Economic comparison of a well-head geothermal power plant and a traditional one,” *Geothermics*, vol. 53, pp. 1–13, 2015, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.04.003.
- [26] F. Giuseppe and P. Herrera, “Viabilidad De La Energía Geotérmica Como Fuente Alternativa De Producción De Energía Eléctrica En Colombia Viability of Geothermal

- Energy As an Alternative Source of Electricity Energy Production in Colombia,” *Alvarado, G., Vargas, A. (2017). Hist. del Descub. y Aprovech. las fuentes Termal. en Costa Rica. Rev. Geológica América Cent. (57), pp. 55 - 84., pp. 1–17, 2019.*
- [27] S. Carlino *et al.*, “Exploitation of geothermal energy in active volcanic areas: A numerical modelling applied to high temperature Mofete geothermal field, at Campi Flegrei caldera (Southern Italy),” *Renew. Energy*, vol. 87, pp. 54–66, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.007.
- [28] Z. Lei *et al.*, “Exploratory research into the enhanced geothermal system power generation project: The Qiabuqia geothermal field, Northwest China,” *Renew. Energy*, vol. 139, pp. 52–70, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.088.
- [29] G. Feng, T. Xu, Y. Zhao, and F. Gherardi, “Heat mining from super-hot horizons of the Larderello geothermal field, Italy,” *Renew. Energy*, vol. 197, no. March, pp. 371–383, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.078.
- [30] B. van der Zwaan and F. Dalla Longa, “Integrated assessment projections for global geothermal energy use,” *Geothermics*, vol. 82, no. February, pp. 203–211, 2019, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.06.008.
- [31] L. Y. Bronicki, *Introduction to geothermal power generation*. Elsevier Ltd, 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100337-4.00001-2.
- [32] I. A. Thain and P. Brown, *New Zealand: A geothermal pioneer expands within a competitive electricity marketplace*. Elsevier Ltd, 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100337-4.00022-X.
- [33] I. Akhmadullin and M. Tyagi, “Numerical analysis of downhole heat exchanger designed for geothermal energy production,” *Geotherm. Energy*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s40517-017-0071-2.

- [34] A. Von Jouanne and T. K. A. Brekken, “Ocean and Geothermal Energy Systems,” *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2147–2165, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2699558.
- [35] G. O. Frioleifsson *et al.*, “Preparation for drilling well IDDP-2 at Reykjanes,” *Geothermics*, vol. 49, pp. 119–126, 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2013.05.006.
- [36] M. C. Moore, *Project permitting, finance, and economics for geothermal power generation*. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100337-4.00018-8.
- [37] G. System and G. Field, “Prospects for Power Generation of the Doublet Supercritical Geothermal System in Reykjanes Geothermal Field, Iceland,” 2022.
- [38] J. Ezekiel, D. Kumbhat, A. Ebigbo, B. M. Adams, and M. O. Saar, “Sensitivity of Reservoir and Operational Parameters on the Energy Extraction Performance of Combined CO₂-EGR–CPG Systems,” 2021.
- [39] G. O. Frioleifsson, W. A. Elders, and A. Albertsson, “The concept of the Iceland deep drilling project,” *Geothermics*, vol. 49, pp. 2–8, 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2013.03.004.
- [40] G. U. Golla, T. Julinawati, R. P. Putri, G. A. Nordquist, F. T. Libert, and A. R. Suminar, “The Salak Field, Indonesia: On to the next 20 years of production,” *Geothermics*, vol. 83, no. August 2019, p. 101715, 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101715.
- [41] T. Bilić, S. Raos, P. Ilak, I. Rajšl, and R. Pašičko, “Assessment of geothermal fields in the South Pannonian basin system using a multi-criteria decision-making tool,” *Energies*, vol. 13, no. 5, 2020, doi: 10.3390/en13051026.
- [42] M. Staněk, Y. Géraud, O. Lexa, P. Špaček, S. Ulrich, and M. Diraison, “Elastic anisotropy and pore space geometry of schlieren granite: Direct 3-D measurements at high confining pressure combined with microfabric analysis,” *Geophys. J. Int.*, vol. 194, no. 1, pp. 383–

- 394, 2013, doi: 10.1093/gji/ggt053.
- [43] K. McDonnell, L. Molnár, M. Harty, and F. Murphy, “Feasibility study of carbon dioxide plume geothermal systems in Germany—utilising carbon dioxide for energy,” *Energies*, vol. 13, no. 10, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/en13102416.
- [44] C. Chelle-Michou, D. Do Couto, A. Moscariello, P. Renard, and E. Rusillon, “Geothermal state of the deep Western Alpine Molasse Basin, France-Switzerland,” *Geothermics*, vol. 67, no. 2017, pp. 48–65, 2017, doi: 10.1016/j.geothermics.2017.01.004.
- [45] S. Homuth, A. E. Götz, and I. Sass, “Reservoir characterization of the Upper Jurassic geothermal target formations (Molasse Basin , Germany): role of thermofacies as exploration tool,” pp. 41–49, 2015, doi: 10.5194/gtes-3-41-2015.
- [46] Y. Zhang, Y. Zhang, L. Zhou, Z. Lei, L. Guo, and J. Zhou, “Reservoir stimulation design and evaluation of heat exploitation of a two-horizontal-well enhanced geothermal system (EGS) in the Zhacang geothermal field, Northwest China,” *Renew. Energy*, vol. 183, pp. 330–350, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.10.101.
- [47] A. M. Przybycin, M. Scheck-Wenderoth, and M. Schneider, “The origin of deep geothermal anomalies in the German Molasse Basin: results from 3D numerical models of coupled fluid flow and heat transport,” *Geotherm. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 1–28, 2017, doi: 10.1186/s40517-016-0059-3.
- [48] H. Öhman and P. Lundqvist, “Thermodynamic pre-determination of power generation potential in geothermal low-temperature applications,” *Geotherm. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1186/s40517-014-0004-2.
- [49] R. Weijermars, L. Zuo, and I. Warren, “Modeling Reservoir Circulation and Economic Performance of the Neal Hot Springs Geothermal Power Plant (Oregon, U.S.): An

- Integrated Case Study,” *Geothermics*, vol. 70, no. April, pp. 155–172, 2017, doi: 10.1016/j.geothermics.2017.04.011.
- [50] T. Case, A. Operacz, A. Zachora-buławaska, I. Strzelecka, and M. Buda, “The Standard Geothermal Plant as an Innovative Combined Renewable Energy Resources System: The Case from South Poland,” 2022.
- [51] X. Wu, G. Xue, G. Fang, X. Li, and Y. Ji, “The Development and Applications of the Semi-Airborne Electromagnetic System in China,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 104956–104966, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930961.
- [52] D. Schiffner, J. Banks, A. Rabbani, L. Lefsrud, and W. Adamowicz, “Techno-economic assessment for heating cattle feed water with low-temperature geothermal energy: A case study from central Alberta, Canada,” *Renew. Energy*, vol. 198, no. August, pp. 1105–1120, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.006.
- [53] M. Esmailpour, M. Gholami Korzani, and T. Kohl, “Impact of thermosiphoning on long-term behavior of closed-loop deep geothermal systems for sustainable energy exploitation,” *Renew. Energy*, vol. 194, pp. 1247–1260, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.06.014.
- [54] J. W. Lund, G. W. Hutterer, and A. N. Toth, “Geothermics Characteristics and trends in geothermal development and use , 1995 to 2020,” *Geothermics*, vol. 105, no. March, p. 102522, 2022, doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102522.
- [55] T. Agemar, J. Weber, and R. Schulz, “Deep geothermal energy production in Germany,” *Energies*, vol. 7, no. 7, pp. 4397–4416, 2014, doi: 10.3390/en7074397.
- [56] S. K. Sanyal and S. L. Eneedy, “Fifty-five years of commercial power generation at The Geysers geothermal field, California: The lessons learned,” *Geotherm. Power Gener. Dev. Innov.*, pp. 591–608, 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100337-4.00020-6.

- [57] M. Lelli *et al.*, “Geothermics Fluid geochemistry of the Los Humeros geothermal field (LHGF - Puebla , Mexico): New constraints for the conceptual model,” *Geothermics*, no. October, p. 101983, 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101983.
- [58] A. Kjeld, H. Johanna, and R. Olafsdottir, “Geothermics Life cycle assessment of the Theistareykir geothermal power plant in Iceland,” *Geothermics*, vol. 105, no. March, p. 102530, 2022, doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102530.
- [59] E. Juliusson and S. Bjornsson, “Optimizing production strategies for geothermal resources,” *Geothermics*, vol. 94, no. January, p. 102091, 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102091.
- [60] A. Barich, A. W. Stokłosa, J. Hildebrand, G. Quinonez, A. C. Casillas, and I. Fernandez, “Social License to Operate in Geothermal Energy,” 2022.
- [61] E. R. Camp, T. E. Jordan, M. J. Hornbach, and C. A. Whealton, “A probabilistic application of oil and gas data for exploration stage geothermal reservoir assessment in the Appalachian Basin,” *Geothermics*, vol. 71, no. September 2017, pp. 187–199, 2018, doi: 10.1016/j.geothermics.2017.09.001.
- [62] A. Allouhi, “Techno-economic and environmental accounting analyses of an innovative power-to-heat concept based on solar PV systems and a geothermal heat pump,” *Renew. Energy*, vol. 191, pp. 649–661, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.04.001.
- [63] F. Cheng, M. Lin, S. Yüksel, H. Di' nçer, and H. Kalkavan, “A Hybrid Hesitant 2-Tuple IVSF Decision Making Approach to Analyze PERT-Based Critical Paths of New Service Development Process for Renewable Energy Investment Projects,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 3947–3969, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048016.
- [64] G. Andres and E. Morales, “Energía Geotérmica: Una Alternativa Para La Matriz Eléctrica

De Chile,” 2018.

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 10 de septiembre del 2024

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado **Revisión de literatura de Proyectos Energéticos basados en Energía Geotérmica**, presentado por el (los) autor(es) **Daniel Santiago Enriquez Pardo y Juan Sebastian Montilla Achicanoy** del Programa Académico **Ingeniería electrónica** al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,


(Firma del Asesor)

FRANCISCO ERASO CHECA (ASESOR)

98397376

Ingeniería Electrónica

3136584666

feraso@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA Mineducación</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Daniel Santiago Enriquez Pardo	Documento de identidad: 1004135601
Correo electrónico: danielenpardo@gmail.com	Número de contacto: 3226072936
Nombres y apellidos del autor: Juan Sebastian Montilla Achicanoy	Documento de identidad: 1085343306
Correo electrónico: jsmontilla.3306@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3184777501
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Francisco Erasó Checa	Documento de identidad: 98397376
Correo electrónico: feraso@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3136584666
Título del trabajo de grado: Revisión de literatura de Proyectos Energéticos basados en Energía Geotérmica	
Facultad y Programa Académico: Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el termino en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA Mineducación</p>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG, por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 10 días del mes de septiembre del año 2024

	
Firma del autor	Firma del autor
Juan Sebastian Montilla Achicanoy	Daniel Santiago Enriquez Pardo
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
 Firma del asesor Francisco Eraso Checa	