



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Análisis de la viabilidad de instalación de una central
geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los
recursos geotérmicos en la isla de La Palma.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de la Energía

AUTOR/A: García Gutiérrez, Sergio

Tutor/a: Magraner Benedicto, María Teresa

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a mi tutora Teresa su completa disponibilidad para supervisar y guiar la elaboración de este trabajo de final de grado. Gracias a su ayuda ha sido un proceso de realización didáctico y agradable.

También me gustaría recordar el apoyo que me ha brindado mi familia y mis seres queridos a lo largo de esta etapa y dar las gracias por ello.

Por último y en especial, quiero agradecer el esfuerzo realizado por mis padres para poder adquirir la formación que deseaba, además de ser unos referentes para mí desde siempre.

RESUMEN

Este Trabajo Final de Grado consiste en establecer una descripción genérica del ciclo de vapor de una central geotérmica para analizar su aplicación a los recursos existentes en la isla de La Palma.

Un estudio del sistema eléctrico de la isla, en el que se vea reflejada la producción y la demanda de energía, es necesario para poder incluir sistemas de generación de energía, como una central geotérmica.

El recurso geotérmico y su situación se estiman en base a los estudios realizados por las entidades encargadas de su exploración e investigación. En las Islas Canarias se estima un potencial geotérmico significativo debido a su actividad volcánica.

Los distintos tipos de centrales para el aprovechamiento eléctrico se analizan, y se valora la opción más adecuada para las condiciones existentes. La viabilidad de la propuesta se obtiene mediante un análisis económico en el que se incluyen ratios de inversiones, gastos, costes de producción o ingresos del proyecto.

De acuerdo con las características de los diferentes tipos de tecnologías de centrales, del recurso geotérmico y del estado del sistema eléctrico de La Palma, se concluye que una potencia de 30 MW es apropiada para la planta geotérmica.

La energía geotérmica contribuye al desarrollo sostenible, desde un punto de vista ambiental, económico y social.

Palabras Clave: Generación eléctrica, geotermia, recurso energético, energía renovable.

RESUM

Este Treball Final de Grau consistix a establir una descripció genèrica del cicle de vapor d'una central geotèrmica per a analitzar la seua aplicació als recursos existents en l'illa de La Palma.

Un estudi del sistema elèctric de l'illa, en el que es veja reflectida la producció i la demanda d'energia, és necessari per a poder incloure sistemes de generació d'energia, com una central geotèrmica.

El recurs geotèrmic i la seua situació s'estimen basant-se en els estudis realitzats per les entitats encarregades de la seua exploració i investigació. En les Illes Canàries s'estima un potencial geotèrmic significatiu a causa de la seua activitat volcànica.

Els distints tipus de centrals per a l'aprofitament elèctric s'analitzen, i es valora l'opció més adequada per a les condicions existents. La viabilitat de la proposta s'obté per mitjà d'una anàlisi econòmica en què s'inclouen ràtios d'inversions, gastos, costos de producció o ingressos del projecte.

D'acord amb les característiques dels diferents tipus de tecnologies de centrals, del recurs geotèrmic i de l'estat del sistema elèctric de La Palma, es conclou que una potència de 30 MW és apropiada per a la planta geotèrmica.

L'energia geotèrmica contribuïx al desenrotllament sostenible, des d'un punt de vista ambiental, econòmic i social.

Paraules clau: Generació elèctrica, geotèrmia, recurs energètic, energia renovable.

ABSTRACT

This Final Degree Project consists in establishing a generic description of the steam cycle of a geothermal plant to analyze its application to existing resources on the island of La Palma.

A study of the electrical system of the island, in which the production and demand of energy is reflected, is necessary to be able to include energy generation systems, such as a geothermal plant.

The geothermal resource and its situation are estimated based on the studies carried out by the entities in charge of its exploration and investigation. In the Canary Islands is estimated an important geothermal potential due to its volcanic activity.

The different types of plants for the use of electricity are analyzed, and the most suitable option for the existing conditions is assessed. The feasibility of the proposal is obtained through an economic analysis that includes investment ratios, expenses, production costs or income of the project.

According to the characteristics of the different types of power plant technologies, the geothermal resource and the condition of the electrical system of La Palma, it is concluded that a power of 30 MW is appropriate for the geothermal plant.

Geothermal energy contributes to sustainable development, from an environmental, economic and social point of view.

Keywords: Electricity generation, geothermal, energy resource, renewable energy.

ÍNDICE

MEMORIA.....	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes.....	13
1.2. Motivación y justificación	14
1.3. Objetivos.....	14
2. NORMATIVA APLICABLE	16
2.1. Marco Normativo Europeo	16
2.2. Marco Normativo Español	16
2.3. Marco Normativo Canario	17
3. LA TECNOLOGÍA GEOTÉRMICA.....	18
3.1. Definición de Energía Geotérmica	18
3.2. Yacimientos Geotérmicos.....	18
3.2.1. Clasificación de los yacimientos geotérmicos.....	18
3.2.2. Gradiente geotérmico	19
3.2.3. Fluidos geotérmicos	20
3.2.4. Exploración e investigación de recursos geotérmicos	21
3.2.5. Investigación en los yacimientos de alta temperatura	21
3.3. Utilización de la Energía Geotérmica.....	22
3.3.1. Producción de electricidad.....	23
3.3.2. Usos térmicos.....	24
3.4. Ventajas e Inconvenientes de la energía geotérmica de alta entalpía.....	25
3.5. Actualidad, Potencias instaladas y Desarrollo futuro	25
3.5.1. Panorama de la energía geotérmica en el mundo.....	26
3.5.2. Desarrollo de la energía geotérmica en Europa	26
3.5.3. Situación y potencial geotérmico en España	27
3.5.4. Situación actual de la geotermia en Canarias	29

4. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE ALTA TEMPERATURA: GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	32
4.1. Tipos de Centrales Geotérmicas	32
4.1.1. Plantas de vapor seco	32
4.1.2. Plantas Flash.....	33
4.1.3. Plantas de ciclo binario	35
4.1.4. Plantas de ciclo combinado.....	37
4.2. Sistemas geotérmicos híbridos.....	37
4.2.1. Energía solar.....	37
4.2.2. Uso combinado de calor y electricidad	38
4.2.3. Recursos geopresurizados.....	39
4.3. Análisis de un sistema geotérmico estimulado	39
5. CENTRAL GEOTÉRMICA DE ALTA ENTALPÍA: TECNOLOGÍA SELECCIONADA	42
5.1. Análisis del recurso geotérmico de La Palma	42
5.2. Tipo de planta geotérmica a diseñar	47
5.2.1. Aspectos de diseño de la central	48
5.2.2. Equipos de la central geotérmica.....	51
6. ÁMBITO DE APLICACIÓN Y RANGO DE SOLUCIONES	53
6.1. Estudio energético de La Palma.....	53
6.1.1. Demanda de potencia	53
6.1.2. Producción de energía	54
6.2. Potencia de la central geotérmica	56
6.3. Posibles localizaciones.....	57
7. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	61
7.1. Inversiones y gastos.....	61
7.1.1. Costes de inversión inicial	61
7.1.2. Costes de operación.....	61
7.1.3. Costes de mantenimiento	63

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

7.2.	Ingresos.....	64
7.2.1.	Venta de energía y precio de la electricidad.....	64
7.2.2.	Retribuciones	64
7.3.	Aspectos económicos	65
7.3.1.	Flujo de caja	66
7.3.2.	Valor actual neto (VAN) y Tasa interna de retorno (TIR)	67
8.	CONCLUSIONES	70
8.1.	Conclusiones de la energía geotérmica.....	70
8.2.	Conclusiones del estudio energético de La Palma	70
8.3.	Conclusiones de la viabilidad económica	71
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	72
	PRESUPUESTO	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica del gradiente geotérmico.	19
Figura 2. Esquema de temperaturas de la Tierra en función de la profundidad.	20
Figura 3. Esquema de yacimiento de alta temperatura.	22
Figura 4. Central geotérmica de ciclo binario, Mokai 2, en Nueva Zelanda.	23
Figura 5. Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con intercambiador vertical (sistema cerrado).	24
Figura 6. Gráfica de la potencia instalada en los 10 primeros países.	26
Figura 7. Áreas geotérmicas nacionales.	28
Figura 8. Zonas de Tenerife prioritarias de sondeos y permisos libres de restricciones ambientales y territoriales.	29
Figura 9. Sistema termoeléctrico en el Parque Nacional de Timanfaya.	30
Figura 10. Zonas de La Palma prioritarias de sondeos y permisos libres de restricciones ambientales y territoriales.	31
Figura 11. Esquema de funcionamiento de una planta de vapor seco.	33
Figura 12. Esquema de funcionamiento de una planta flash.	34
Figura 13. Esquema de funcionamiento de una planta doble-flash.	35
Figura 14. Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario.	36
Figura 15. Esquema de una central geotérmica binaria asistida con energía solar.	38
Figura 16. Diagrama del CHP (Combined Heat and Power).	38
Figura 17. Espectro EGS: Gradiente de temperatura vs Permeabilidad.	40
Figura 18. Esquema de un sistema geotérmico estimulado.	41
Figura 19. Estructura geológica de La Palma, según su construcción a lo largo de la historia. ..	42
Figura 20. Modelo sobre la desgasificación de Cumbre Vieja basado en el análisis geoquímico.	43
Figura 21. Modelo de anomalías de densidad 3D, en sus secciones horizontales y verticales. ..	44
Figura 22. Modelo bidimensional de resistividad del estudio magnetotelúrico correspondiente a los tres perfiles de mediciones de la zona oeste de Cumbre Vieja.	45
Figura 23. Representación del modelo de resistividad 3D a distintas profundidades.	46
Figura 24. Mapa de recursos geotérmicos de España.	47
Figura 25. Sistema de recolección con el separador ciclónico (CS) en la sala de máquinas (PH). Puntos negros = Pozos de producción. Puntos blancos = Pozos de inyección.	48

Figura 26. Sistema de recolección con estaciones de separadores satélite y un receptor de vapor (SR) antes de la sala de máquinas de la central.	49
Figura 27. Sistema de recolección con separadores de vapor individuales en cada boca de pozo de producción.	49
Figura 28. Esquema de funcionamiento de una central flash.....	50
Figura 29. Detalle de una turbina de vapor en proceso de instalación en la central geotérmica de San Jacinto Tizate, en Nicaragua.	50
Figura 30. Evolución de la demanda de energía real (curva amarilla), la demanda prevista (curva verde) y la programada (curva roja), el día 25 de enero de 2022.....	53
Figura 31. Evolución de la demanda de energía real (curva amarilla), la demanda prevista (curva verde) y la programada (curva roja), el día 20 de julio de 2021.	54
Figura 32. Proporción de energías renovables a las 14:00 horas del día 18 de junio de 2022 en la demanda total. Central térmica (gris), energía eólica (verde) y solar fotovoltaica (naranja). 55	
Figura 33. Generación acumulada de las diferentes tecnologías: Central térmica (gris), energía eólica (verde) y energía solar fotovoltaica (naranja), el día 18 de junio de 2022.....	56
Figura 34. Zonas prioritarias para realizar sondeos.	57
Figura 35. Situaciones que cumplen con restricciones ambientales y territoriales, dentro de las zonas prioritarias de los sondeos.	57
Figura 36. Localización de una posible planta geotérmica cerca de Las Caletas, Fuencaliente. 58	
Figura 37. Ubicación de una central geotérmica en Lomo Oscuro, Villa de Mazo.	59
Figura 38. Situación de una posible central geotérmica en Tacande, El Paso.	59
Figura 39. Localizaciones de la posible instalación de una central geotérmica de alta entalpía en la isla de La Palma.	60
Figura 40. Evolución del flujo de caja neto a lo largo de la vida de la instalación.	67
Figura 41. Fórmula para el cálculo del Valor actual neto (VAN).	67
Figura 42. Expresión para obtener la Tasa interna de retorno (TIR).....	68
Figura 43. Representación del VAN en función de la tasa de descuento.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades termodinámicas de posibles fluidos de trabajo en plantas binarias.	36
Tabla 2. Clasificación de las características de los emplazamientos.	60
Tabla 3. Costes de inversión.	61
Tabla 4. Gastos de los equipos de la planta geotérmica.	62
Tabla 5. Gastos en los pozos de producción e inyección.	62
Tabla 6. Gastos en la mano de obra.	62
Tabla 7. Gastos en las grandes reparaciones.	63
Tabla 8. Gastos en el recurso geotérmico.	63
Tabla 9. Resumen de ingresos y gastos en la central geotérmica.	65
Tabla 10. Flujo de caja de la central geotérmica de 30 MW.	66
Tabla 11. Determinación del VAN y de la TIR.	68
Tabla 12. Componentes del presupuesto.	77

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.

Los intentos por frenar el cambio climático han llevado a tener que reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se ha visto reflejado en acciones contra el cambio climático como el Acuerdo de París, cuyo fin es limitar el calentamiento global a 1,5 grados centígrados. (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2015).

Esto supone recurrir, entre otras cosas, a fuentes de energía limpias para poder generar energía de una manera respetable con el medioambiente, sin tener que emitir estos gases atmosféricos. Las energías renovables son fuentes de energía libres de gases de efecto invernadero, por lo que pueden contribuir a resolver los problemas ambientales.

Asimismo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) integran una motivación para avanzar en la protección de los recursos del planeta, mejorar la vida de las personas y tener una sociedad más igualitaria. La Agenda 2030 la componen 17 objetivos que deben alcanzarse desde 2015 hasta 2030. Sin embargo, a día de hoy el progreso es reducido y lento. Por tanto, en la década de 2020 se debe incrementar el ritmo de acción. (ONU, 2020).

Con el estímulo de cumplir con los ODS, las energías renovables pueden aportar valor en lo relacionado con la energía asequible y no contaminante, además de influir en otros objetivos.

También están existiendo problemas económicos relacionados con los precios de los combustibles utilizados para producir energía en centrales térmicas convencionales. Tanto la gasolina como el gasóleo se han encarecido sin pausa. En dos meses y medio, la gasolina ha subido un 13,8% y el gasóleo, un 17,6%. (ARANDA J.L., 2022).

En la isla de La Palma la proporción de generación eléctrica con fuentes convencionales es del 90,3%, y por tanto, el consumo de combustibles en el total de energía primaria también es elevado. (La Palma Renovable, 2021).

Hay una gran dependencia de estos combustibles para generar la energía eléctrica, algo que es innecesario si se tiene la capacidad de producirla con los recursos naturales que existen. Las energías renovables permiten disminuir la dependencia energética y el gasto económico en combustibles fósiles importados debido a la capacidad de generar la electricidad localmente.

Las energías renovables también son capaces de crear empleo en la región donde se produce la energía eléctrica. El sector de las energías verdes creará 43 millones de puestos de trabajo para el 2030 a nivel mundial. (Educaweb, 2021). Por ello, contribuye a resolver un problema social como el desempleo.

Los problemas económicos, sociales y medioambientales hacen que una sociedad no consiga progresar hacia una situación de bienestar y desarrollo.

1.2. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.

El interés en realizar el presente TFG surge a partir de algunos conocimientos adquiridos en el Grado en Ingeniería de la Energía. El desarrollo de las diferentes tecnologías de energías renovables es un propósito esencial para un futuro en el que el respeto por el medio ambiente y la sostenibilidad sean las bases de un nuevo modelo energético. Dadas las condiciones existentes, un proyecto de una central geotérmica en La Palma puede aportar una base energética más consistente en la isla, además de cooperar en la resolución de los diversos problemas actuales.

La puesta en marcha de una central geotérmica de alta entalpía en la isla de La Palma sería capaz de contribuir a solucionar algunos de estos problemas. Provocaría una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en la isla, debido a la inclusión de producción eléctrica de origen renovable. También, puede permitir aumentar la independencia energética isleña debido a la reducción de combustibles fósiles importados. Además, se necesitarían nuevos puestos de trabajo para la construcción, gestión y mantenimiento de la central geotérmica.

Asimismo, puede ayudar a desarrollar esta tecnología en otros recursos geotérmicos de Canarias para aportar más energía renovable al sistema energético de la comunidad. Esto aporta un valor tecnológico mayor en lo relativo a la producción energética.

La industria se puede ver enriquecida y habrá un aporte de valor tecnológico en ella, lo que es fundamental para un correcto desarrollo de una sociedad con objetivos que permitan el progreso. Por ello, hay también un interés tecnológico e industrial en esta forma de producción de energía, que sirva como ejemplo en otros lugares del mundo.

1.3. OBJETIVOS.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una descripción del ciclo de vapor de una central geotérmica de alta entalpía, con el fin de aprovechar los recursos geotérmicos de alta temperatura que existen en la isla de La Palma.

Analizar el sistema eléctrico de la isla es importante para conocer la situación energética en la que se encuentra y poder aportar una solución viable y adecuada. Además, la viabilidad económica del proyecto se estudia mediante los parámetros económicos necesarios.

Esta central tiene la función de producir energía eléctrica, para así contribuir al consumo de energía renovable en la isla. Aporta energía gestionable, con un reducido impacto ambiental y se podrán aprovechar mejor los recursos energéticos disponibles de manera local.

El TFG quiere poner en valor que se puede contribuir al desarrollo sostenible, con la energía geotérmica, desde un punto de vista ambiental, económico y social.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Los objetivos particulares del proyecto son:

- Análisis de las tecnologías más empleadas en los ciclos de vapor.
- Análisis de la normativa aplicable a las centrales geotérmicas para la producción de electricidad.
- Selección del ciclo de vapor más adecuado.
- Evaluación de la demanda de energía eléctrica de La Palma.
- Análisis de la inversión.
- Estudio de viabilidad económica.
- Análisis de las mejoras que supondría para la isla la implantación de esta tecnología.

2. NORMATIVA APLICABLE

En este apartado se analiza el marco normativo que se aplica a la geotermia de alta entalpía, para producción de electricidad. Se compone de distintas normas que tienen que considerarse para la legislación, tramitación y diseño de un sistema geotérmico de alta entalpía.

2.1. MARCO NORMATIVO EUROPEO.

Dentro de la normativa y política europea se conoce una directiva de energías renovables. La publicación de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, establece la aprobación del fomento de la utilización de energía procedente de fuentes renovables. En esta, se le da un reconocimiento al sector de la energía geotérmica en los términos aprobados por el Parlamento Europeo.

La Directiva 2009/28/CE ha sido refundada y derogada por la directiva vigente, la Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, que también se encuentra relacionada con la intención de fomentar la utilización de energía que procede de fuentes renovables. (Boletín Oficial del Estado, 2018). Esta modificación se debe a la adaptación de los principios originales a los nuevos tiempos.

En esta normativa se implanta que cada uno de los Estados Miembros debe instaurar un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables, en los cuales se fijan los objetivos de los usos renovables. En estos planes se establecen las medidas necesarias para conseguir cumplir los objetivos.

2.2. MARCO NORMATIVO ESPAÑOL.

A nivel nacional, dentro del marco regulatorio que influye en la geotermia, se puede mencionar la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Se describe que los recursos geotérmicos se incluyen en la “sección D”, de la cual forman parte todos aquellos yacimientos o recursos geológicos de interés energético. Además, en esta “sección D” se particularizan las autorizaciones de: permisos de exploración y permisos de investigación. También se puede otorgar el derecho a aprovechar el recurso mediante las concesiones de explotación.

Asimismo, existen otras normas relacionadas con la regulación renovable de la actualidad, que hay que tener en cuenta en el proyecto.

- Real Decreto – Ley 9/2013, de 12 de julio, que consiste en una guía normativa en la que el sector energético renovable se apoya, de manera general. En esta norma se asegura la estabilidad financiera del sector eléctrico.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, en la que se establecen las bases para poder regular el régimen económico de las renovables.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

- Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, que instaura la regulación de las actividades de generación de la energía eléctrica mediante las fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

A su vez, este Real decreto cuenta con órdenes que influyen en las energías renovables, como una regulación específica. Se tiene en cuenta la Orden 1045/2014, mediante la que se acogen instalaciones tipo (ITs) y también se instauran los parámetros retributivos de 2013-2016. Además, la Orden 171/2020 implanta revisiones de la retribución a la operación.

- Real Decreto – Ley 15/2018, de 5 de octubre, por el que se aprueban un conjunto de medidas urgentes para la transición energética y para aportar la protección de los consumidores.
- Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, que establece las condiciones administrativas, técnicas y económicas referidas al autoconsumo de energía eléctrica. (APPA Renovables, 2022).

En consideración a los Planes de Acción Nacionales de Energías Renovables de los Estados Miembros, en España se ha desarrollado el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Este plan tiene como objetivos principales conseguir una reducción del 23% de emisiones de gases de efecto invernadero respecto al nivel de 1990, integración de las energías renovables y aumentar la eficiencia energética en un 39,5%. (BOE, 2021).

Dentro de este plan de acción, la energía geotérmica también tiene influencia dentro de las medidas que se establecen. Para resolver los problemas geográfico y de mercado eléctrico en las islas, la geotermia de alta entalpía se contempla como una opción al ser una tecnología madura. Además, también se tiene en cuenta en el despliegue de las tecnologías bajas en carbono.

La geotermia somera también forma parte del plan de descarbonización en el ámbito residencial y en edificación, puesto que contribuye a la climatización y al ACS (agua caliente sanitaria) de una manera sostenible y eficaz.

2.3. MARCO NORMATIVO CANARIO.

Dentro de la normativa que se da en la comunidad autónoma de Canarias, no se encuentran leyes específicas para la geotermia. Sin embargo, al ser una instalación eléctrica influye en el proyecto el Decreto 141/2009, al estar relacionado con los procedimientos administrativos pertinentes.

- Decreto 141/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento por el que se regulan los procedimientos administrativos relativos a la ejecución y puesta en servicio de las instalaciones eléctricas en Canarias.

(Gobierno de Canarias, 2009).

3. LA TECNOLOGÍA GEOTÉRMICA

3.1. DEFINICIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA.

Energía geotérmica se denomina a la energía calorífica que se encuentra almacenada en el subsuelo. El calor de la Tierra puede ser encontrado en cualquier lugar del mundo. Sin embargo, la energía geotérmica de alta temperatura, la cual es necesaria para poder generar electricidad en centrales geotérmicas, se encuentra en relativamente pocos lugares.

Situaciones relacionadas con la actividad volcánica, fuentes termales, géiseres o fumarolas, son algunas en las que se evidencia la energía de alta temperatura. En cambio, la energía de baja y muy baja entalpía no se asocia a estos fenómenos.

La geotermia es la ciencia que se encarga de estudiar el calor de la Tierra, su origen, su distribución y sus formas de aprovechamiento.

3.2. YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS.

Se debe apreciar la diferencia imperante entre el yacimiento geotérmico y el recurso geotérmico. El yacimiento es el espacio físico situado en el interior de la corteza terrestre en el cual se localiza el recurso geotérmico.

En cambio, el recurso es la parte que representa la fracción de la energía geotérmica que es factible aprovechar de una manera viable técnicamente y económicamente. Además de incluir los recursos que son conocidos hoy en día, con un aprovechamiento viable desde los puntos de vista técnico y económico, también se incorporan los recursos que en un futuro cercano serán viables.

(Geoplat, 2010).

3.2.1. Clasificación de los yacimientos geotérmicos.

Los yacimientos pueden ser clasificados según:

- Yacimientos en rocas permeables con un fluido geotérmico que es agua o vapor.

Se dividen en función de la temperatura del fluido geotérmico.

- Alta temperatura ($T > 150^{\circ}\text{C}$): De vapor seco o de vapor húmedo.
- Media temperatura ($100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$).
- Baja temperatura ($30^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$).
- Muy baja temperatura ($T < 30^{\circ}\text{C}$).

Si el yacimiento se encuentra a una temperatura de acuerdo al gradiente geotérmico normal, pero está a una presión de entre 600 y 900 atm, es un yacimiento geopresurizado.

- Yacimientos en rocas impermeables o secas (sin fluido geotérmico natural).
 - Alta temperatura ($350^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$): Roca caliente seca y Sistemas geotérmicos estimulados.
 - Muy baja temperatura ($T < 30^{\circ}\text{C}$).
- Yacimientos especiales.
 - Sistemas marinos.
 - Sistemas magmáticos.

(ORCHE GARCÍA, E., 2011).

3.2.2. Gradiente geotérmico.

Se puede conocer lo que ocurre en la parte más superficial de la corteza terrestre, pero no del todo a profundidades demasiado elevadas. Según medidas y estudios realizados en la capa más externa del globo, lo que hay en las capas más profundas del interior del planeta solo puede ser deducido por medidas indirectas.

El gradiente geotérmico observado en la mayor parte de la Tierra es de unos $2,5 - 3^{\circ}\text{C}$ cada cien metros, es decir, se aumentan $25 - 30^{\circ}\text{C}$ por kilómetro de profundidad, lo que se conoce como gradiente geotérmico normal.

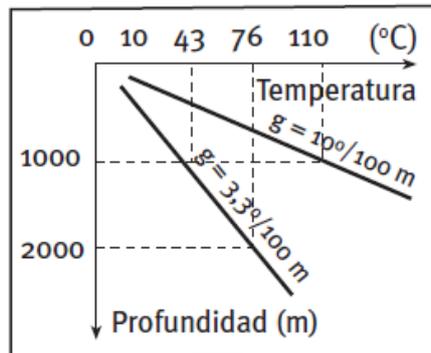


Figura 1. Gráfica del gradiente geotérmico. Fuente: IDAE, IGME (2008). *Manual de Geotermia*.

En algunas zonas limitadas, el gradiente geotérmico es muy superior al normal. Es una medida fácilmente obtenible y permite estimar la cantidad de flujo de calor que se puede transmitir desde las zonas más internas hasta las más externas.

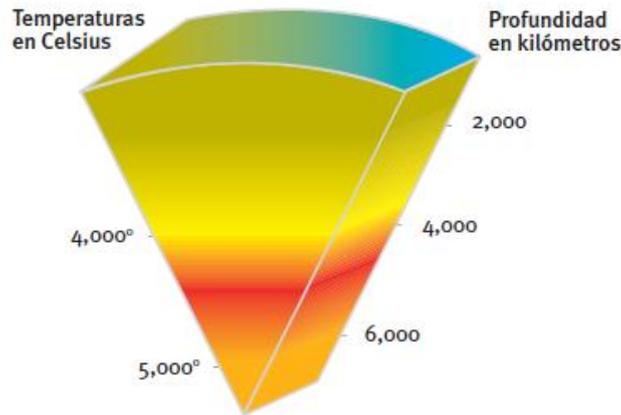


Figura 2. Esquema de temperaturas de la Tierra en función de la profundidad. Fuente: IDAE, IGME (2008). *Manual de Geotermia*.

3.2.3. Fluidos geotérmicos.

Extraer el calor almacenado en el subsuelo de forma directa es complicado. Para facilitar el proceso de aprovechamiento, se dispone de un fluido que aumenta de temperatura al absorber calor una vez se inyecta en el recurso a través de sondeos. Luego, es necesario transportarlo hasta la superficie para destinarlo a la producción de electricidad.

El fluido geotérmico está compuesto de agua en estado líquido o en forma de vapor. El agua tiene distintos grados de pureza en función de la cantidad de sustancias disueltas. Los tipos de sustancias disueltas en el fluido termal pueden ser compuestos solubles y también gases.

La composición química de los fluidos depende en gran medida del equilibrio de roca y fluido que tenga el sistema hidrotermal. Una parte de los solutos localizados en el fluido geotérmico pueden originarse en reacciones entre las aguas subterráneas y las rocas con las que hacen contacto. Por otro lado, estudios de los gases nobles disueltos reflejan que son en su mayoría atmosféricos, aunque si hay una mayor proporción de helio, se puede explicar si una parte de este procede del manto.

De forma generalizada, el aumento de temperatura provoca que la cantidad de sales disueltas también aumente. La concentración de estos compuestos es muy variable de unos fluidos a otros. (ORCHE GARCÍA, E., 2011).

Las características del fluido geotérmico influyen en la eficiencia del proceso de producción de energía en una planta geotérmica debido a la forma de transmitir el calor a los componentes de la central. Por esta razón, se buscan soluciones para tratar de reducir el efecto de la composición del fluido en la central para tener un uso más sostenible.

El proyecto REFLECT se relaciona con el plan de Tecnología Estratégica de Energía de la UE, y tiene como objetivo definir las propiedades físicas y químicas de un amplio rango de fluidos geotérmicos. Con ello, se pueden resolver problemas de eficiencia de operación, economía y viabilidad de un proyecto geotérmico. (JORQUERA, C., 2020).

3.2.4. Exploración e investigación de recursos geotérmicos.

A diferencia de otras energías renovables, la geotérmica necesita estrategias de búsqueda debido a las características de recurso mineral. La localización y evaluación de estos recursos requiere técnicas que se aplican a la investigación de hidrocarburos, hidrogeológica y otros recursos minerales.

Para alta entalpía, podemos enumerar varias fases de investigación:

- Reconocimiento: Caracterización de regiones geotérmicas.
- Prefactibilidad: Selección de zonas, estimación potencial, modelo de campo y delimitación de puntos de interés.
- Factibilidad: Adecuación del modelo de campo, evaluación del yacimiento, diseño modelo de explotación, valoración económica.

A partir de aquí, se considera el aprovechamiento del recurso geotérmico:

- Desarrollo y explotación: Actualización de información y evaluación precisa del modelo.
- Renovación o desmantelamiento: Retorno a fase de explotación o restauración de los terrenos.

También se utilizan diferentes técnicas de prospección para tener una mayor fiabilidad:

- Geológicas: Condiciones geológicas del yacimiento como el foco de calor, almacén y cobertura.
- Geoquímicas: Se confirma la existencia de fluidos geotérmicos y también sus propiedades físico-químicas.
- Geofísicas: Se delimita el yacimiento geoméricamente y se definen sus características térmicas (temperatura y flujo de calor).

Los sondeos exploratorios sirven para confirmar todos los datos previos y evaluar el yacimiento geotérmico.

3.2.5. Investigación en los yacimientos de alta temperatura.

Los yacimientos de alta temperatura ($T > 150^{\circ}\text{C}$) son los más valiosos debido a que el producto final obtenible es la energía eléctrica. También son los más complejos y caros de investigar puesto que se debe plantear la utilización de las técnicas variadas de prospección, costosas y más sofisticadas.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

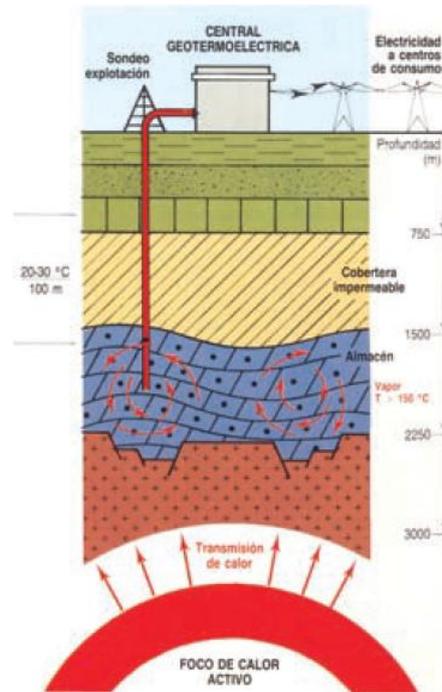


Figura 3. Esquema de yacimiento de alta temperatura. Fuente: IDAE, IGME (2008). *Manual de Geotermia*.

Los recursos se encuentran normalmente en áreas con gradientes geotérmicos elevados, a profundidades muy variables, entre 1500 y 3000 metros. Estos recursos de alta temperatura están relacionados con zonas con anomalías de calor y alta inestabilidad geológica, como la actividad volcánica, sísmica, manifestaciones termales o la formación de cordilleras recientes.

La investigación se puede definir como un proceso de búsqueda y evaluación de una zona en la que se pueda aprovechar económicamente la energía geotérmica. Se determinan:

- Geometría del yacimiento.
- Energía que se puede explotar.
- Forma de aprovechar el yacimiento.

Existe una etapa inicial, unas etapas intermedias y una etapa final, en las que los métodos de investigación son cada vez más costosos. Al final de cada etapa se debe realizar un cálculo de rentabilidad técnico-económica, para saber si se sigue investigando o se abandona.

3.3. UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

Los yacimientos geotérmicos pueden ser aprovechados para dos fines principales; la producción de energía eléctrica y la utilización del calor obtenido. Estos usos dependen de la temperatura a la que se encuentre el recurso geotérmico.

3.3.1. Producción de electricidad.

El uso de los recursos geotérmicos para la generación de electricidad, como fuente de energía primaria, es una aplicación muy importante. Cuando la temperatura del fluido es alta o muy alta, que suele ser superior a 150 °C, esta aplicación es posible.

Esta energía eléctrica se produce en un ciclo de vapor parecido al que se utiliza en las centrales térmicas convencionales, el ciclo Rankine, lo que representa un sistema geotérmico convencional. Asimismo, pueden emplearse acuíferos calientes localizados en cuencas sedimentarias profundas, y también sistemas geotérmicos estimulados.

Principalmente, existen tres tipos de plantas geotérmicas de alta temperatura o alta entalpía que se emplean en la generación de energía eléctrica:

- Centrales de vapor seco.
- Centrales de vapor-flash.
- Centrales de ciclo binario.



Figura 4. Central geotérmica de ciclo binario, Mokai 2, en Nueva Zelanda. Fuente: IDAE, IGME (2008). *Manual de Geotermia*.

Las diferencias entre cada una residen en la temperatura a la que se encuentra el recurso y las condiciones en las que se encuentra el fluido termal al llegar a la superficie. Si la temperatura es más elevada llega mayor proporción de vapor, mientras que si la temperatura es más baja se obtiene una mezcla de líquido-vapor.

En el caso de que el recurso se encuentre a media temperatura, entre 100 y 150 °C, los rendimientos obtenidos son más bajos y se debe utilizar un fluido secundario con mejores propiedades termodinámicas en las centrales de ciclo binario.

Hoy en día se investiga en los yacimientos de roca caliente seca o sistemas geotérmicos estimulados con el objetivo de tener la posibilidad de producir energía eléctrica en yacimientos de alta temperatura con la ausencia de fluido o con baja permeabilidad.

(Geoplat, 2010).

3.3.2. Usos térmicos.

Aprovechar directamente el calor es la opción más común y antigua, puesto que no se suelen encontrar grandes cantidades de recursos geotérmicos de alta temperatura. Por este motivo, los recursos de baja y muy baja temperatura son los que se aprovechan para el uso directo.

Los recursos geotérmicos de baja temperatura, entre 30 y 100 °C, se aprovechan en calefacción residencial, balnearios, agricultura, acuicultura y usos en la industria como, por ejemplo, tratamientos textiles o extracción de productos químicos.

Cuando la temperatura del subsuelo es menor a 30 °C se considera un recurso de muy baja temperatura. A partir de los 10-15 metros de profundidad la temperatura del terreno es aproximadamente igual a la temperatura media ambiente anual del lugar, a causa de la radiación solar que calienta el suelo. En estas situaciones se recurre al uso de la bomba de calor. (IDAE, 2011).

A través de una bomba de calor geotérmica y un sistema de captación del calor apropiado, es factible transmitir calor desde el terreno, cuya temperatura depende de la ubicación, a otra fuente a 40-45 °C, la cual se emplea en la calefacción residencial y en conseguir agua caliente para uso doméstico. Además, se encuentra la posibilidad de tener refrigeración doméstica en verano, cediendo el calor del edificio al subsuelo mediante el mismo intercambiador de calor. Incluso se considera la aplicación del mismo sistema en piscinas climatizadas.

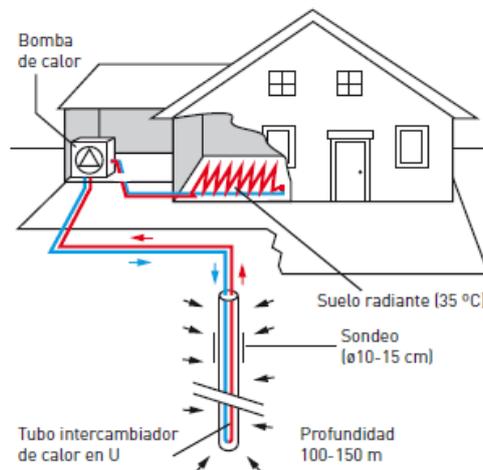


Figura 5. Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con intercambiador vertical (sistema cerrado). Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

Hay diferentes formas de instalar los intercambiadores en el subsuelo y sin embargo, la función es la misma. La combinación de los intercambiadores con la bomba de calor geotérmica aporta la opción de aprovechar la temperatura del subsuelo y conseguir otra fuente con la que intercambiar calor en un sentido u otro, con el objetivo de conseguir climatización y confort térmico. La cantidad de opciones para climatización doméstica hace que sea una inversión a largo plazo interesante para instalaciones nuevas.

3.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE ALTA ENTALPÍA.

En este apartado se comentan las ventajas y los inconvenientes que implica la energía geotérmica de alta temperatura, con la función principal de producir energía eléctrica.

En primer lugar, las ventajas más significativas de esta fuente de energía son:

- Única energía renovable independiente de las influencias las horas del día, de las estaciones del año y del clima.
- Recursos enormes.
- Utilización versátil.
- No es necesaria demasiada mano de obra.
- Es local y se encuentra libre de dependencias externas.
- Energía gestionable que aporta estabilidad al sistema eléctrico y mayor seguridad de suministro.
- Desarrollo tecnológico elevado.
- Cantidad de energía que se puede ajustar a las necesidades.
- El recurso no experimenta un alza de precios durante la explotación.
- Emisiones de CO₂ y SO₂ más bajas que en las centrales térmicas convencionales.
- Costes competitivos.

En segundo lugar, estos son los inconvenientes más comunes que se suelen dar:

- Pocos yacimientos de alta temperatura.
- Producción de energía eléctrica con rendimiento bajo en los casos en los que se tiene un vapor con baja temperatura.
- Alto contenido salino y de gases no condensables del agua de los yacimientos de alta temperatura. Es necesario reinyectar el agua en el subsuelo.
- Hay que proteger los acuíferos atravesados por los pozos geotérmicos con el fin de evitar su contaminación debida las aguas o vapores.
- Inducir sismicidad de baja intensidad, consecuencia del drenaje.
- Elevado coste de investigación de recursos geotérmicos. Pueden tener un riesgo que se asocia a la existencia del yacimiento y con ello, para el capital de la inversión.

(ORCHE GARCÍA, E., 2011).

3.5. ACTUALIDAD, POTENCIAS INSTALADAS Y DESARROLLO FUTURO.

En este apartado se describe la situación actual de la energía geotérmica, se comentan datos de potencias instaladas y se observan las previsiones futuras que existen a nivel global, europeo, nacional y local.

3.5.1. Panorama de la energía geotérmica en el mundo.

Los primeros pasos en la generación de electricidad mediante la energía geotérmica empiezan en Italia en 1904. Se instala la primera planta en 1913, de 250 kW. Se consigue llegar en Italia a los 300 MW en 1950. En Nueva Zelanda, se comienza a producir electricidad con la energía geotérmica en 1958, en México en 1959 y en Estados Unidos en 1960.

La mayor progresión de este tipo de instalaciones se da a partir de 1973, coincidiendo con la crisis del petróleo. Con ello, se incorpora también en Japón, Islandia, Indonesia, Kenia, Turquía o Costa Rica.

La utilización del calor del subsuelo directamente se lleva desarrollando bastante más tiempo, empezando con los balnearios o en Islandia el uso para calefacción de invernaderos en los años 20. Al igual que con la generación de electricidad, el uso del calor geotérmico de baja temperatura tuvo mayor auge a partir de 1973.

En el año 2000, la potencia instalada de geotermia de alta entalpía para poder generar electricidad es de 7.974 MW. Además, el país con mayor potencia instalada es Estados Unidos, con 2.228 MW. (IGME, 2002).

Actualmente, la situación es diferente a nivel mundial. Con el tiempo se ha instalado una mayor cantidad de plantas geotérmicas en aquellos lugares en los que es más sencilla su explotación. A finales del año 2020, la potencia instalada se encuentra en 15.608 MW, por lo que se ha incrementado respecto al año 2000. Estados Unidos continúa siendo el territorio con la mayor cantidad de capacidad geotérmica instalada, con 3.676 MW. (Geoplat, 2021).

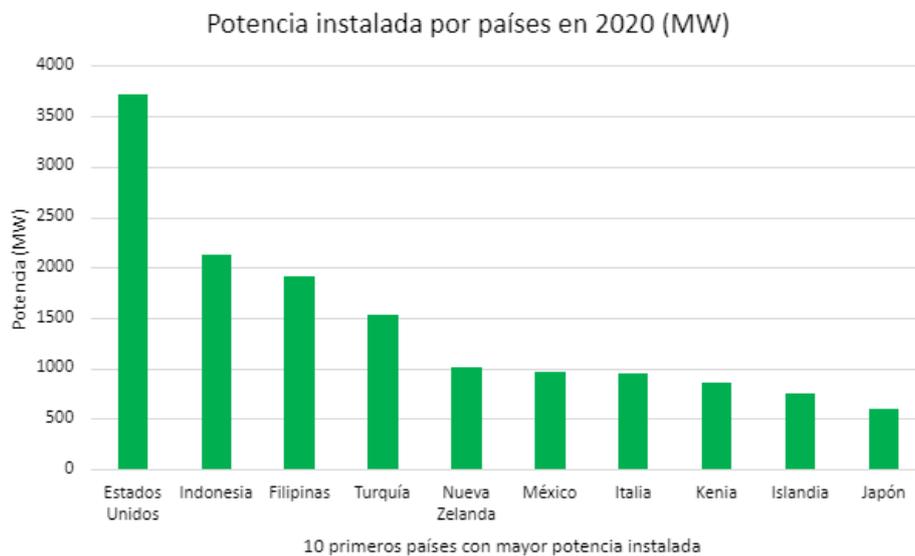


Figura 6. Gráfica de la potencia instalada en los 10 primeros países. Fuente: Propia.

3.5.2. Desarrollo de la energía geotérmica en Europa.

En el continente europeo, los informes elaborados por el Consejo Europeo de la Energía Geotérmica (EGEC) han reflejado un incremento del desarrollo constante de la energía

geotérmica durante la década 2010-2020. Sin embargo, algunas malas decisiones políticas han ralentizado el crecimiento en determinados mercados.

A finales del año 2020, la potencia geotérmica instalada en Europa es de 3.500 MW, que se distribuye en un total de 139 centrales. Los países europeos con los principales yacimientos geotérmicos son Italia, Islandia, Francia, Austria, Hungría y Bulgaria, que también son los que tienen más capacidad geotérmica instalada. En 2020, en Italia la potencia instalada es de 944 MW.

De acuerdo con el informe de mercado del EGEN de 2020, se puede afirmar que se necesitan políticas que puedan apoyar a la energía geotérmica. Mediante una competencia justa con precios del carbono fijos y la eliminación de las subvenciones a combustibles fósiles. Asimismo, se requieren licencias y permisos con una tramitación fluida y también, invertir en la innovación de la energía geotérmica. (MOSQUERA, P., 2021).

Acorde con los informes del Consejo Europeo de la Geotermia en los que se establecen los planes de la Unión Europea en lo que respecta a la producción eléctrica de las fuentes geotérmicas, se detallan unos determinados objetivos.

El objetivo más cercano actualmente, respecto a la energía geotérmica es el Objetivo 2030: Hacia una fuente de electricidad competitiva.

Se pretende con ello, disminuir los costes de las centrales para que se consiga una competitividad con otras fuentes de energía.

Además, se intenta reemplazar las centrales de combustibles fósiles con la implantación de programas de construcción.

También se desea transferir esta tecnología fuera de Europa, en áreas con reducidos recursos geotérmicos, con la experiencia conseguida y la capacidad para desarrollar proyectos de ingeniería.

Desarrollo de tecnologías para explotación de fluidos y temperaturas supercríticas (350-600 °C). Además de la explotación de grandes almacenes submarinos.

El Objetivo 2050: Parte sustancial del suministro base de electricidad.

En 2050, la tecnología va a permitir un coste más competitivo de desarrollo en todo el mundo. Se intentará una implementación rápida y amplia, para poder abarcar la mayor parte posible de producción eléctrica de base.

3.5.3. Situación y potencial geotérmico en España.

En un contexto en el que las energías renovables obtienen cada vez mayor peso, la energía geotérmica se ha mantenido fuera del panorama energético español. El escaso conocimiento de esta fuente de energía, su elevado coste inicial y la reducida regulación para llevar a cabo los proyectos, son los principales impedimentos que provocan que esta tecnología no

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

progrese. Además, existe una falta de voluntad política para dar a conocer e investigar las energías renovables térmicas.

Sin embargo, ofrece un gran potencial para la producción eléctrica ininterrumpida. Acorde a estudios realizados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), los recursos existentes con mayor potencial se localizan en las Islas Canarias, el Noroeste Peninsular, Pirineo Central, Cuenca del Ebro, Cadenas costeras catalanas, Cordilleras Béticas, Cuenca-Albacete, Cuenca del Guadalquivir, Salamanca-Cáceres.

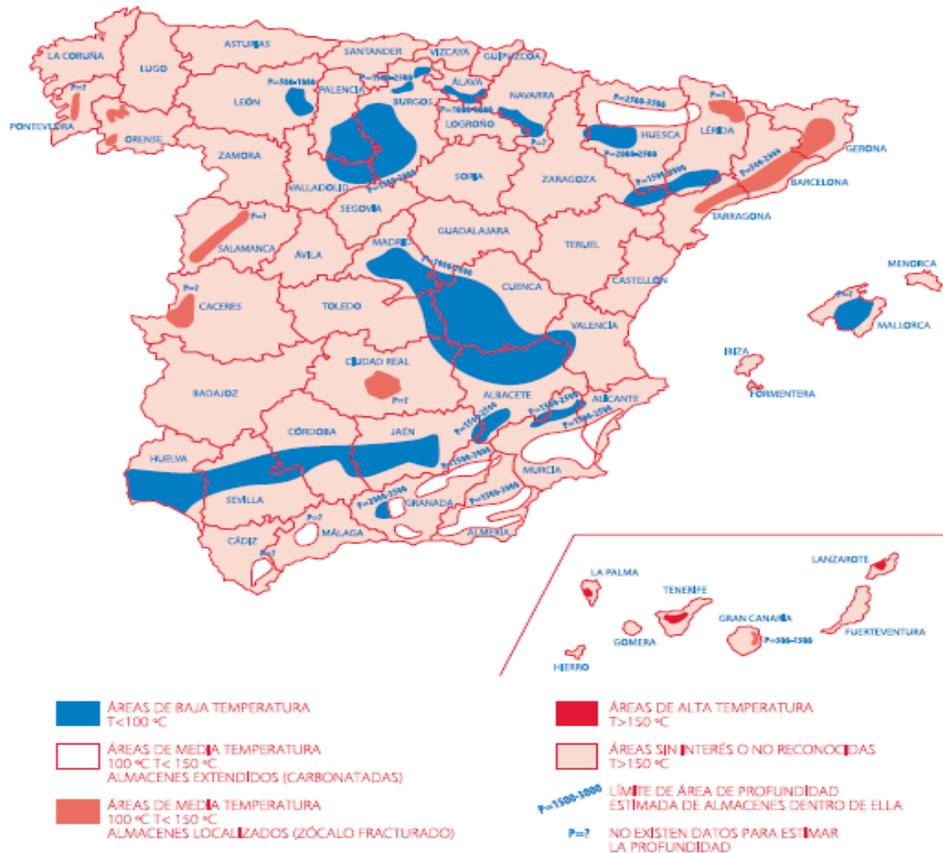


Figura 7. Áreas geotérmicas nacionales. Fuente: Geoplát (2010). *Visión a 2030*.

Los recursos geotérmicos permiten la instalación de plantas geotérmicas de alta temperatura en localizaciones determinadas, principalmente en Cataluña y en las Islas Canarias, además de algunas zonas intramontañosas en las que la tectónica de placas condiciona la existencia de estos recursos de alta temperatura. Actualmente, no existen instalaciones de alta entalpía, aunque cada vez hay más interés en desarrollarla.

Por otro lado, la geotermia de baja temperatura, actualmente se encuentra más arraigada en distintas aplicaciones de calefacción y refrigeración. En Europa, la implementación de estos sistemas basados en una bomba de calor geotérmica ha sido más rápida. Esto se debe a que esta fuente de energía se comenzó a desarrollar solamente en calefacción, siendo la demanda de calefacción en España más reducida que en la mayoría de países europeos. A pesar de esto, una vez se demuestra que es posible su aplicación también en refrigeración, la demanda de estos sistemas empieza a aumentar en mayor medida.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Respecto a las potencias instaladas en España, la energía geotérmica de alta entalpía no tiene representación, al no existir ninguna central geotérmica para producción de electricidad.

En cuanto a la energía geotérmica de baja entalpía, en el año 2022 se alcanzan los 293 MW de potencia geotérmica instalada, repartiéndose en las distintas formas de aprovechamiento como calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria o climatización en piscinas. Estos usos se encuentran principalmente en el ámbito residencial. (Geoplat, IDAE, 2022).

Al comparar la potencia instalada actualmente en España con la que había en los países europeos en cuanto a bombas de calor en 2006, Suecia tenía una capacidad de 2.491 MW, seguido de Alemania, con 995,7 MW. Por tanto, como en la actualidad estas potencias se han visto incrementadas, España tiene una capacidad instalada muy inferior. (IDAE, IGME, 2008).

3.5.4. Situación actual de la geotermia en Canarias.

Los estudios geotérmicos realizados en las Islas Canarias desde los años 70, reflejan que se compone de un territorio favorable para posibilitar el aprovechamiento de la energía geotérmica de alta entalpía. Los estudios se han centrado en las islas consideradas con mayor potencial. La actividad volcánica es una manifestación de los recursos geotérmicos existentes en el subsuelo.

- **Tenerife.**

En Tenerife hay estudios detallados y existen buenas perspectivas desde el punto de vista del recurso geotérmico en algunas localizaciones. En los años 90, se desarrolló un sondeo de 1.060 metros de profundidad donde se llegaron a alcanzar 56 °C, con un gradiente geotérmico medio de 48 °C/km, y en los 160 metros finales, de 94 °C/km. (ITC, 2020).

Actualmente, al tener la fase de exploración un nivel de madurez interesante, se lleva a cabo una fase de decisión sobre el lugar donde se debe perforar para alcanzar el yacimiento, debido a las limitaciones de los territorios protegidos medioambientalmente en la isla.

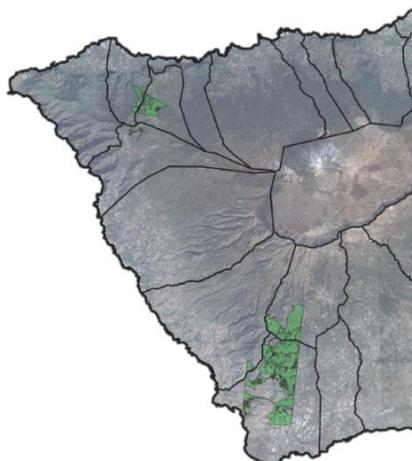


Figura 8. Zonas de Tenerife prioritarias de sondeos y permisos libres de restricciones ambientales y territoriales. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*.

- **Lanzarote.**

La isla donde se desempeñaron los primeros estudios geotérmicos fue Lanzarote. En la zona de Timanfaya hay zonas con unas temperaturas de casi 600 °C a menos de 15 metros de profundidad. Sin embargo, no existe un fluido que permita la explotación del calor en una central geotérmica para generar electricidad, en vista de que la caracterización de un modelo geotérmico de roca caliente seca superficial (SHDR). A pesar de esto, se experimenta con sistemas de placas termoeléctricas que permiten generar electricidad utilizando la diferencia de temperaturas del subsuelo y el aire atmosférico.



Figura 9. Sistema termoeléctrico en el Parque Nacional de Timanfaya. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias.*

- **La Palma.**

Desde un punto de vista energético, la isla con mayores posibilidades de desarrollar la geotermia es La Palma. La reducida demanda energética, en comparación con las otras islas analizadas, permitiría cubrir una gran parte de la demanda de electricidad en la isla. Además, gracias a los estudios geofísicos realizados de medición de gases, inversión gravimétrica 3D, estudios magnetoteléuticos o sondeos de Audio-MT, se reconocen las zonas que tienen próximos los depósitos de magma, las cuales son de mayor provecho. Todavía no se han llevado a cabo sondeos para comprobar las conclusiones obtenidas, por lo que es aconsejable seguir con las investigaciones. (ITC, 2020).

La mayoría de las exploraciones muestran como zonas de interés las regiones que rodean Cumbre Vieja por los lados este y oeste hasta llegar al sur de la isla. Como consecuencia de la topografía, las profundidades de las perforaciones para llegar al recurso pueden ser mayores que en Tenerife, alrededor de los 2.500 – 3.000 metros. (IGME, 2022).

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

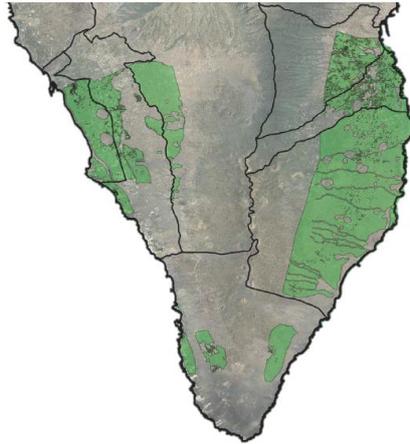


Figura 10. Zonas de La Palma prioritarias de sondeos y permisos libres de restricciones ambientales y territoriales. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*.

4. ENERGÍA GEOTÉRMICA DE ALTA TEMPERATURA: GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

4.1. TIPOS DE CENTRALES GEOTÉRMICAS.

Las centrales geotérmicas de generación eléctrica se distribuyen en tres tipos principales. Se diferencian en las características y estado del fluido geotérmico disponible y la profundidad a la que se encuentre el recurso.

4.1.1. Plantas de vapor seco.

Las centrales de vapor seco fueron las primeras centrales que se desarrollaron para producción eléctrica. Llevan en operación desde hace más de 100 años, cuando en 1904 se instaló la primera de estas en Larderello, Italia. Actualmente, las plantas instaladas de este tipo se encuentran en The Geysers, California, y en Matsukawa, Japón.

El fluido llega a la superficie a través de las fracturas del suelo que contienen el vapor saturado o bien levemente recalentado (vapor seco). Este se dirige a una turbina de vapor que genera la electricidad de manera directa. Esto hace que el coste de producción sea reducido. Las instalaciones de vapor seco son relativamente simples, en comparación con los otros sistemas.

- **Sistema de recolección de vapor.**

Se necesita un pozo en el que se inyecta el fluido condensado, y también un pozo de producción con el que se recupera el vapor, en el cual se localizan las válvulas necesarias y un purificador de vapor. También se requiere un colector que elimina sólidos de gran tamaño, y un separador centrífugo que excluye condensados y partículas sólidas de pequeño tamaño.

Las tuberías del vapor están cubiertas de aislamiento y contienen puntos de drenaje de vapor localizadas a lo largo de estas para eliminar el condensado y retenerlo en estanques para poder reinyectarlo. También hay un alivio de presión de emergencia para usarlo en caso de una sobrepresión en la turbina.

Al final de la tubería, al llegar a la sala de máquinas, existe un eliminador de humedad que es generalmente un separador de ciclón vertical, y también un tubo de Venturi para medir el caudal de vapor entrante.

- **Sistema de conversión de energía.**

Una vez que el vapor llega a la sala de máquinas, el funcionamiento de la central es el mismo que en una central térmica convencional. Primero, el vapor entra en la turbina de vapor, en la cual se genera energía mecánica y debido a su conexión con el generador, se produce electricidad.

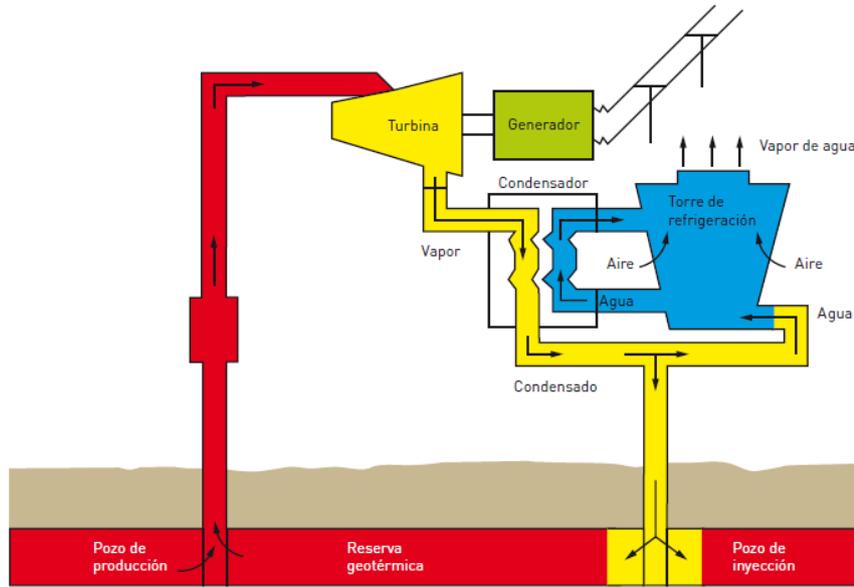


Figura 11. Esquema de funcionamiento de una planta de vapor seco. Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

4.1.2. Plantas Flash.

Se trata de la tecnología para aprovechar el recurso geotérmico más frecuente. Un 29% de las plantas geotérmicas son de flash simple. Estas constituyen cerca del 43% de la potencia instalada de energía geotérmica mundial. Cada central tiene un rango de potencias alcanzadas de entre 3 y 117 MW, con un promedio de 27 MW.

El fluido que alcanza la superficie es una mezcla de líquido-vapor a una presión que depende del pozo y de la temperatura de saturación. Generalmente, la temperatura del recurso está entre 180 y 250 °C. (IDAE, 2011), (DIPIPPO, R., 2012).

El proceso de flash indica que el fluido ha sufrido un proceso de transición desde un líquido presurizado a una mezcla líquido-vapor, como consecuencia de la disminución de la presión del fluido geotérmico por debajo de la presión de saturación correspondiente a su temperatura. El punto en el que da lugar este fenómeno es importante en el funcionamiento de la central.

- **Sistema de recolección de vapor.**

Cuando en los pozos geotérmicos se produce la mezcla de líquido-vapor, el fluido debe enviarse a unos separadores, que son recipientes de presión ciclónico y cilíndrico, en los que se dividen las fases con una mínima pérdida de presión. El vapor resultante se dirige a la turbina de vapor, y la parte líquida se devuelve para utilizarse en otras aplicaciones.

Una planta flash simple de aproximadamente 30 MW necesita de 5 a 6 pozos de producción y entre 2 y 3 pozos de inyección. Suelen ser perforados distribuidos a través del terreno o también, varios desde una misma plataforma. Asimismo, se instalan tuberías que transportan el fluido geotérmico desde los pozos de producción a la sala de máquinas, las cuales pueden ser modificadas si se agregan unidades nuevas de potencia más adelante.

También es posible utilizar los sistemas de vapor doble-flash, los cuales llevan el agua líquida a través de varios separadores, cada vez a menor presión. El vapor que se separa a baja presión, se traslada a una turbina de baja presión, o también se puede enviar a la parte de baja presión de una turbina multietapas.

Una preocupación en estos sistemas de recolección del vapor es la pérdida de presión desde la boca del pozo hasta la sala de máquinas. La variable que más se tiene en cuenta para evitar el problema es el diámetro de la tubería.

- **Sistema de conversión de energía.**

Cuando el vapor es separado de la mezcla líquido-vapor, llega a la turbina de vapor en la que se produce la energía mecánica necesaria para que el generador genere la electricidad. Este sistema es igual que en las centrales térmicas.

En el caso de las plantas de doble flash, suele existir una línea de alta presión conectada con una turbina de alta presión y otra línea de baja presión que llega a una turbina de baja presión, aunque también se pueden conectar ambas líneas a una turbina de doble admisión. Este tipo de instalación tiene la ventaja de que se puede mejorar la eficiencia del ciclo de vapor y con ello se da un mayor aprovechamiento del recurso. Sin embargo, los costes de producción son mayores.

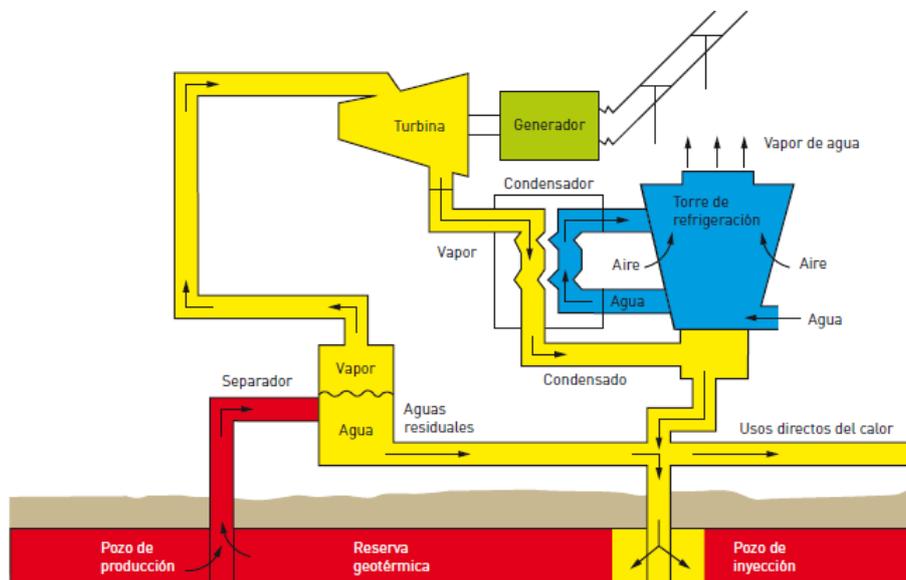


Figura 12. Esquema de funcionamiento de una planta flash. Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

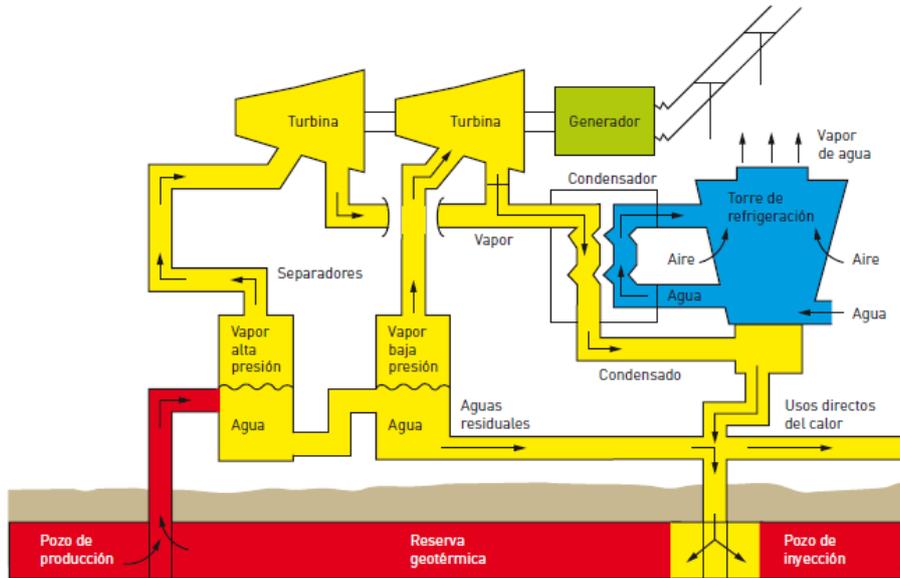


Figura 13. Esquema de funcionamiento de una planta doble-flash. Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

4.1.3. Plantas de ciclo binario.

Las centrales geotérmicas de ciclo binario son las más parecidas, en sus principios termodinámicos, a una central térmica o nuclear convencional, en las que el fluido de trabajo se encuentra en un ciclo cerrado. Actualmente, constituyen un 40% del total de centrales geotérmicas en operación, sin embargo, solamente se produce un 6,6% de la potencia total, al ser centrales con menor capacidad. Su potencia media por unidad es de 3 MW, aunque hay unidades que pueden llegar a los 21 MW mediante un diseño de ciclo con 2 turbinas que impulsan un solo generador. (DiPIPPo, R., 2012)

El recurso geotérmico se encuentra a una temperatura media, entre 120 y 150 °C, o tiene un fluido geotérmico con una alta salinidad. El fluido secundario de trabajo tiene mejores propiedades termodinámicas que el fluido geotermal.

El fluido termal intercambia calor con el fluido secundario mediante un intercambiador de calor. Este fluido secundario se calienta, evapora y expande a través de la turbina. Seguidamente, se condensa en el condensador de aire o agua y se lleva otra vez al intercambiador de calor para re-vaporizarlo mediante una bomba de alimentación.

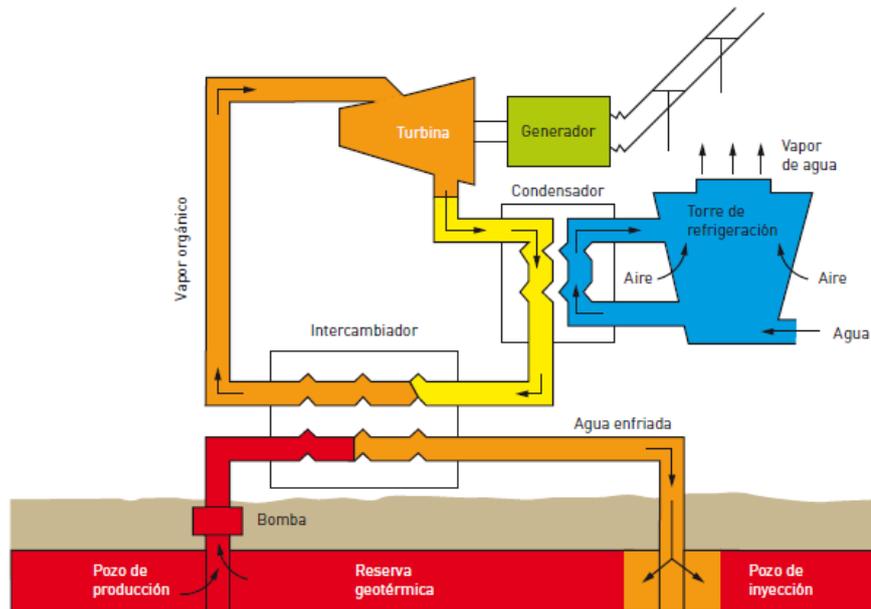


Figura 14. Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario. Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

- **Selección del fluido de trabajo.**

Una cuestión importante es la selección del fluido secundario que se utiliza en el ciclo cerrado. La elección del fluido tiene consecuencias significativas para el rendimiento de una planta de ciclo binario. Hay diversas opciones disponibles entre las que elegir el fluido, sin embargo también hay algunas limitaciones relacionadas con sus propiedades termodinámicas, impacto ambiental, seguridad y salud.

En la tabla inferior se representan algunos posibles fluidos y sus propiedades termodinámicas más relevantes. Todos los fluidos representados tienen temperaturas y presiones más bajas que el agua, mientras que las presiones de saturación son superiores. Esto permite reducir las pérdidas termodinámicas en los intercambiadores de calor.

Tabla 1. Propiedades termodinámicas de posibles fluidos de trabajo en plantas binarias.

Fluido	Fórmula	T _c (°C)	P _c (MPa)	P _s a 300 K (MPa)	P _s a 400 K (MPa)
Propano	C ₃ H ₈	96.95	4.236	0.9935	n.a.
Isobutano	i-C ₄ H ₁₀	135.92	3.685	0.3727	3.204
n-Butano	C ₄ H ₁₀	150.8	3.718	0.2559	2.488
Isopentano	i-C ₅ H ₁₂	187.8	3.409	0.09759	1.238
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	193.9	3.240	0.07376	1.036
Amoniaco	NH ₃	133.65	11.627	1.061	10.3
Agua	H ₂ O	374.14	22.089	0.003536	0.24559

4.1.4. Plantas de ciclo combinado.

El objetivo que persigue una planta de ciclo combinado es aprovechar las mejores prestaciones de las plantas flash y binaria en conjunto. Son los yacimientos de vapor a elevada presión en los que se saca más eficacia del ciclo combinado flash-binario.

Lo que ocurre en este tipo de ciclo es que el vapor geotérmico separado mediante el proceso flash se emplea para generar electricidad a través de la turbina conectada al generador. Por otro lado, el vapor que expulsa la turbina a menor presión se condensa en el evaporador del sistema binario. Existe un tanque que recolecta el condensado de vapor, salmuera y gases que se introducen en el pozo de inyección.

Este tipo de central geotérmica no tiene emisiones al entorno. El impacto ambiental que se experimenta es únicamente el calor que se expulsa a la atmósfera por los condensadores del ciclo binario.

4.2. SISTEMAS GEOTÉRMICOS HÍBRIDOS.

Los sistemas híbridos aumentan la efectividad al añadir otro tipo de recurso en una central geotérmica. El recurso geotérmico se puede acoplar con otras fuentes de energía sea cual sea el origen de estas. Se analizan algunas opciones interesantes.

4.2.1. Energía solar.

Utilizar la energía geotérmica combinada con la solar tiene como fin conseguir un resultado en el que la planta híbrida supere a dos plantas de estas dos tecnologías por separado. En este caso, la energía geotérmica se considera incesante, sin embargo la energía solar no es continua todo el tiempo puesto que su aporte desaparece de noche y en condiciones con nubosidad. Por este motivo, existen limitaciones en estos diseños híbridos.

Si se tiene en cuenta el aspecto económico, las configuraciones óptimas favorecen a la energía geotérmica y no a la solar. Actualmente, debido a la economía, no se encuentran soluciones viables a la configuración híbrida geotérmica-solar, aunque es posible que en el futuro se alcance la viabilidad termodinámica y económica.

Existen tres posibilidades de instalaciones híbridas con energía geotérmica y solar:

- Centrales solares térmicas apoyadas con energía geotérmica.
- Centrales geotérmicas binarias asistidas con energía solar térmica.
- Centrales geotérmicas flash potenciadas con energía solar térmica.

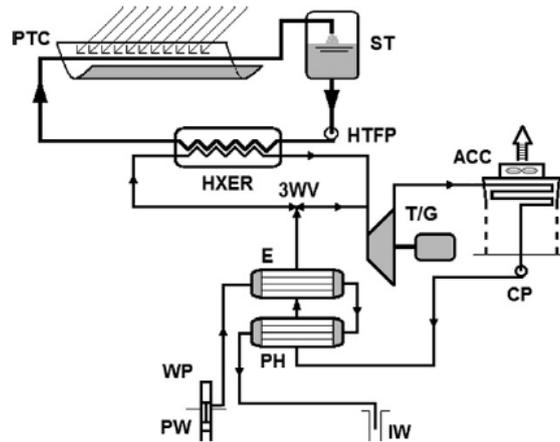


Figura 15. Esquema de una central geotérmica binaria asistida con energía solar. Fuente: DiPIPPo, R. (2012). *Geothermal Power Plants*.

4.2.2. Uso combinado de calor y electricidad.

La posibilidad de aprovechar el recurso geotérmico para producir electricidad y utilizar directamente el calor existe en algunos lugares como Islandia y Japón. Se sirven del recurso geotérmico para cubrir demandas de electricidad y calefacción utilizando una central geotérmica.

Con este modelo híbrido de uso combinado de calor y electricidad o producción en cascada se captura el calor residual de la salmuera que sobra antes de volverla a introducir por el pozo de inyección, una vez se ha producido la energía eléctrica. Esto hace que la eficiencia de la utilización del recurso aumente.

El uso directo del calor se puede emplear, además de la climatización de distrito, en invernaderos, aplicaciones industriales o piscicultura.

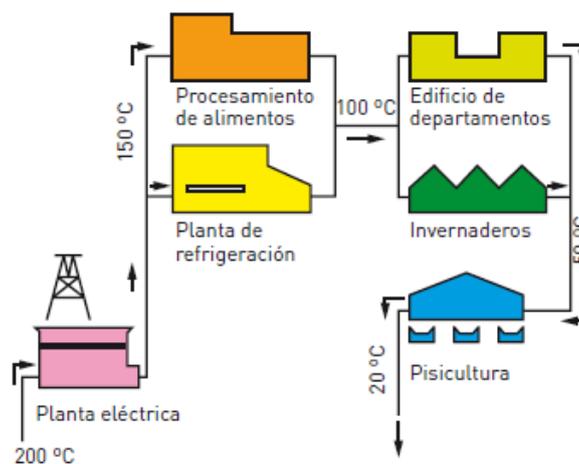


Figura 16. Diagrama del CHP (Combined Heat and Power). Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

4.2.3. Recursos geopresurizados.

En algunas zonas como en la costa norte del Golfo de México hay recursos con geopresión, con presiones más elevadas que la hidrostática. Los fluidos que se localizan en el recurso tienen una alta temperatura además de la elevada presión existente. Asimismo contienen gases disueltos como metano, que es el principal componente del gas natural, los cuales se podrían aprovechar en la instalación geotérmica.

La viabilidad de las plantas geotérmicas geopresurizadas depende en gran medida de las características del recurso. La presión debe ser lo suficientemente alta, el fluido debe estar lo suficientemente caliente y debe haber una cantidad significativa de metano disuelto.

Con el objetivo de aumentar la eficiencia del ciclo, se recupera el calor generado en la combustión del metano que se encuentre en el recurso. Por este motivo, la cantidad de metano disuelto condiciona la viabilidad de la central geotérmica. Además, la solubilidad de este gas en soluciones acuosas depende de la presión, temperatura y salinidad.

Los recursos geopresurizados podrían ser económicamente viables una vez que el precio de la electricidad y el gas natural sean más adecuados, sin embargo, esto no es previsible que suceda a corto plazo.

4.3. ANÁLISIS DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO ESTIMULADO.

Los sistemas geotérmicos estimulados (EGS) representan la materia de desarrollo e investigación geotérmica basada en la localización de estructuras que favorezcan el aprovechamiento de yacimientos geotérmicos de alta temperatura con una muy baja permeabilidad.

- **Roca caliente seca.**

La tecnología de roca caliente seca (HDR) actúa en yacimientos que consisten en formaciones de granito, principalmente, los cuales tienen una alta temperatura pero son completamente impermeables o secos.

Se trata de aplicar técnicas de creación de fracturas y estimulación mediante fracturación hidráulica (hidrofracking), las cuales son indispensables para conseguir un recurso geotérmico con una calidad comercial.

La primera localización donde se empleó este sistema fue Valles Caldera en Nuevo México, en el proyecto Fenton Hill, entre 1973 y 1996. (DiPippo, R., 2012).

- **Sistemas geotérmicos estimulados.**

Al igual que en la tecnología de roca caliente seca, también se emplean técnicas de fracturación hidráulica para poder tener un recurso productivo. La diferencia con los sistemas HDR, es que en los sistemas geotérmicos estimulados (EGS) existe mayor permeabilidad de la roca, aunque aún así, carecen de permeabilidad suficiente.

En función de la relación entre el gradiente de temperaturas y la permeabilidad del yacimiento, se pueden visualizar en el siguiente gráfico los sistemas geotérmicos, entre los que se incluyen los sistemas hidrotermales profundos, cuya permeabilidad es mayor.

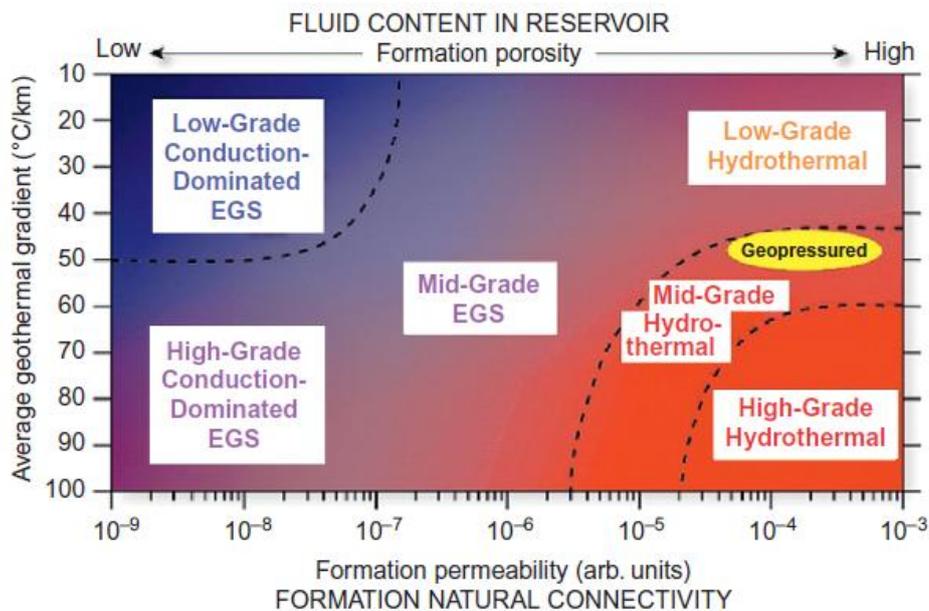


Figura 17. Espectro EGS: Gradiente de temperatura vs Permeabilidad. Fuente: DIPIPO, R. (2012). *Geothermal Power Plants*.

Se ha creado un mayor interés en el desarrollo de estos sistemas. Además de poder usarse para crear nuevos yacimientos de alta temperatura, se puede aplicar para ampliar la extensión de yacimientos que se encuentran en producción eléctrica, y con ello, aumentar el número de reservas geotérmicas y la productividad.

Con estos tipos de tecnologías, la central geotérmica funcionaría de la forma que se describe a continuación.

Primero se perfora hasta alcanzar la roca caliente, a 3 - 5 km de profundidad, dependiendo del yacimiento. Seguidamente se inyectan grandes volúmenes de agua a alta presión en el pozo, con el fin de aumentar la permeabilidad de las rocas artificialmente mediante la hidrofracturación. Se rompen las grietas y se aumenta el tamaño de las fisuras.

El agua a presión se calienta a medida que aumenta su profundidad hasta que llega a los 200 °C aproximadamente. Mediante los pozos de producción se bombea hasta la superficie y se

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

utiliza un separador agua-vapor para utilizar el vapor en la turbina y poder producir electricidad. El agua líquida se vuelve a inyectar a las profundidades para volverse a calentar.

De acuerdo con los criterios actuales de la tecnología, las condiciones para el desarrollo de un sistema geotérmico estimulado (EGS) se pueden resumir en lo siguiente:

- Existencia de masa de roca dura, granítica o metamórfica con baja permeabilidad en su matriz.
- Existencia de fracturación regional que afecte a la masa de roca.
- Cierta grado de anomalía.

En la figura 18 se pueden visualizar las perforaciones de inyección y de producción, gracias a las cuales se realiza la fracturación hidráulica. Asimismo se observa la sala de máquinas y el intercambiador de calor de los que se compone la central geotérmica.

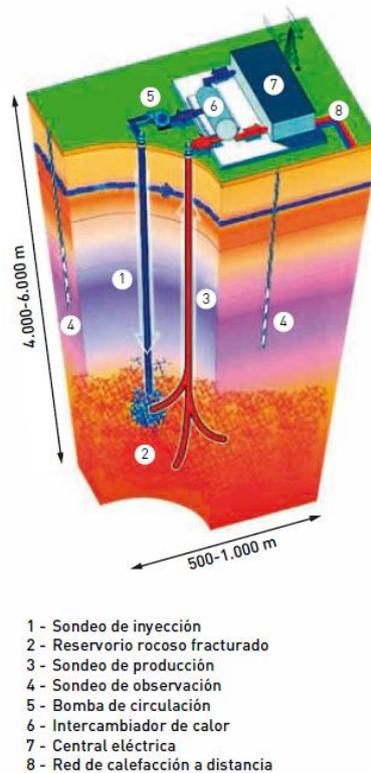


Figura 18. Esquema de un sistema geotérmico estimulado. Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

Según varias investigaciones es posible conseguir una viabilidad técnica al obtener calor a partir de rocas a elevada temperatura y con un bajo contenido en agua. Sin embargo, los costes que conlleva recuperar el calor de estos yacimientos con baja permeabilidad hacen que estos sistemas aún no sean competitivos.

5. CENTRAL GEOTÉRMICA DE ALTA ENTALPÍA: TECNOLOGÍA SELECCIONADA

La selección del tipo de central geotérmica se realiza para que la forma en la que se obtiene la energía eléctrica sea la más eficiente posible. Este proceso depende de las características del recurso geotérmico existente en La Palma, por lo que se debe realizar un análisis para establecer la tecnología más adecuada.

5.1. ANÁLISIS DEL RECURSO GEOTÉRMICO DE LA PALMA.

La Palma es considerada un lugar interesante para poder aprovechar los recursos geotérmicos con el objetivo de producir energía eléctrica. Se trata de una isla volcánica joven y con vulcanismo activo, que podría utilizar los métodos geotérmicos convencionales.

Es la isla canaria con un número mayor de erupciones volcánicas históricas, que son: Tacande o Montaña Quemada, 1470-1492; Volcán Martín de Tegalate, 1646; Volcán de San Antonio, 1677-78; erupción de El Charco, 1712; Volcanes Hoyo Negro, Duraznero y Llano del Banco, 1949; Volcán de Teneguía, 1971; Volcán Cumbre Vieja, 2021. Por ello, el potencial geotérmico es indiscutible. (ITC, 2020).

En la figura 19 se puede observar la estructura geológica de La Palma. La que la parte sur es la que tiene un mayor vulcanismo activo y en la que ocurren las erupciones históricas.

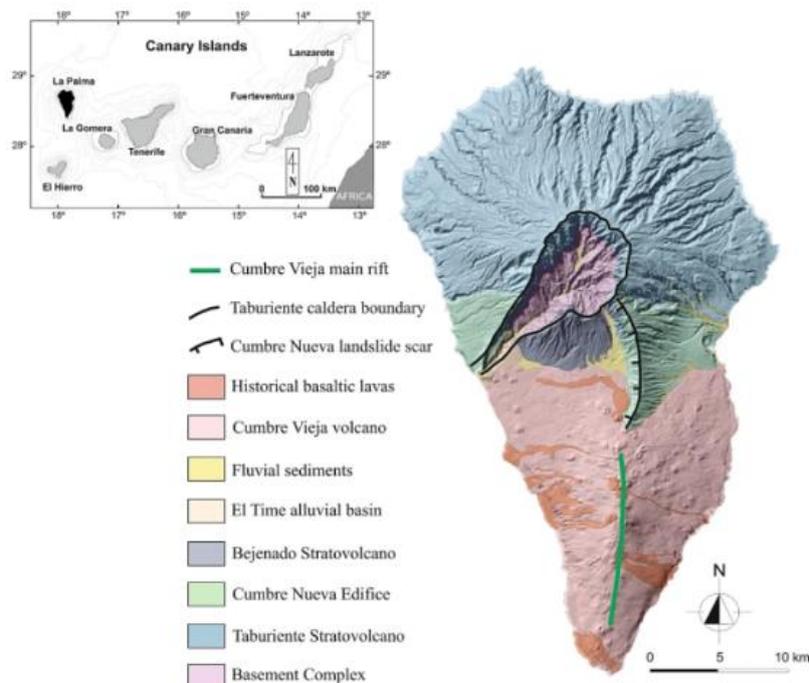


Figura 19. Estructura geológica de La Palma, según su construcción a lo largo de la historia. Fuente: El Time (2020). *Un estudio científico en 3D revela la presencia de un sistema geotérmico activo en Cumbre Vieja.*

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

En la década de los 80, por parte del IGME, se llevaron a cabo unos estudios en la parte sur de la isla, en las proximidades del volcán Teneguía. Se realizaron 33 sondeos de 10 m, 9 sondeos de 40 m y uno de 100 m. Esta técnica hizo que los cálculos de los gradientes de temperatura no fueran convincentes. Aun así, con estos estudios se alcanzó la deducción de que el calor se transmitía hacia la superficie mediante la convección del vapor de agua y de gases calientes.

No se efectuaron más estudios, hasta que la empresa Ingennio Energy Solutions, S.L., reanuda en 2003 algunos trabajos de exploración con el fin de implantar una central geotérmica en Fuenfcaliente. Se llegaron a exponer tres modelos geotérmicos que podrían explicar los datos recogidos en estos estudios y en los anteriores:

- Los gases magmáticos profundos ascendentes calientan el único foco de agua termal, que es la Fuente Santa.
- Acuífero freático alimentado por aguas meteóricas, que se calienta mediante un elevado gradiente geotérmico. No se llega al punto de ebullición debido a la alta presión.
- Sistema geotérmico convencional, el cual se abastece de aguas de lluvia que empiezan a fluir por las grietas permeables. En este modelo se conseguirían aguas a más de 200 °C y a alta presión, a una profundidad superior que el acuífero del modelo anterior.

En los estudios se concluye que el primer modelo sería el que tiene mayor probabilidad de existir, lo que no es tan propicio para la generación eléctrica, aunque estas conclusiones están basadas en análisis geoquímicos de las aguas meteóricas calientes por los gases profundos, y no se fundamentan en resultados de carácter geotérmico.

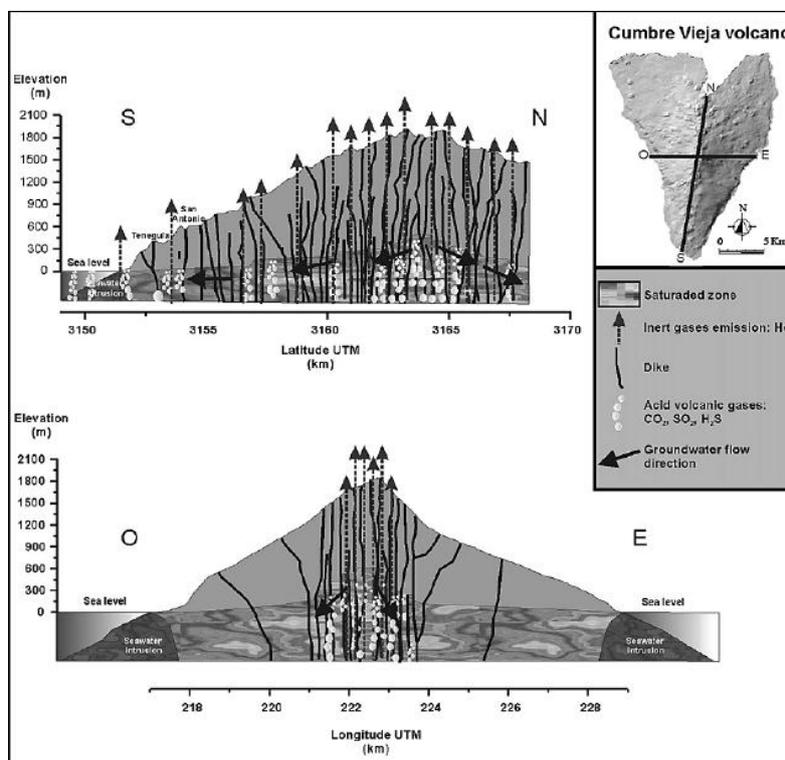


Figura 20. Modelo sobre la desgasificación de Cumbre Vieja basado en el análisis geoquímico. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

En los últimos tiempos se han llevado a cabo algunas investigaciones geofísicas y geoquímicas en La Palma, de las que son responsables el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) y el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN). En estas se ejecuta una vigilancia de unos 570 puntos en la zona sur de la isla para poder medir las emisiones difusas de CO₂ alrededor de Cumbre Vieja.

Como se puede observar en la figura 20, los flujos de aguas subterráneas y los procesos de desgasificación de helio son más frecuentes en la dirección norte-sur, que siguen a la cordillera de Cumbre Vieja. Mientras tanto, los gases más reactivos (CO₂, SO₂ y H₂S) permanecen disueltos en el acuífero central, mayoritariamente.

En el año 2009, el Instituto de Astronomía y Geodésica del CSIC, en colaboración con la Universidad de California y la Universidad Politécnica de Madrid, desarrollaron un modelo de inversión gravimétrica con 318 puntos de medida en toda la isla.

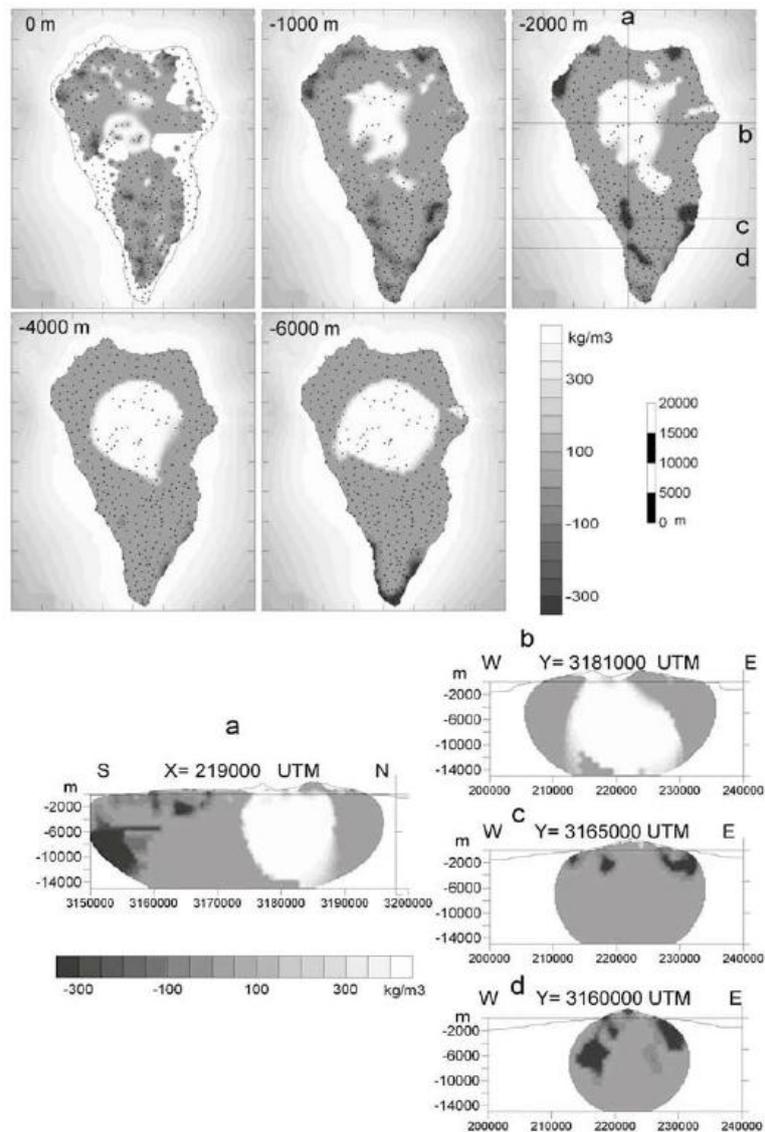


Figura 21. Modelo de anomalías de densidad 3D, en sus secciones horizontales y verticales. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Como se puede observar en el modelo anterior, las zonas de alta densidad se sitúan bajo la Caldera de Taburiente, que se sitúa en la zona central de la isla. Asimismo existen zonas con una baja o muy baja densidad, que significan anomalías térmicas localizadas en el manto superior, que pueden ser interesantes. También representan partes con fracturación activa del subsuelo que se corresponden con la actividad volcánica. Por ello, las zonas de baja densidad son más favorables para el aprovechamiento de la energía geotérmica.

El CSIC y el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, también en 2009, procedieron a efectuar un estudio magnetoteléxico de la parte oeste de Cumbre Vieja. Se utilizaron 28 estaciones de medida repartidas en 3 perfiles a diferentes latitudes, que han permitido construir un modelo de inversión 2D que muestra una zona resistiva somera de 1 km de grosor que se traslada hacia el exterior. Las zonas representadas en la figura 22 se interpretan como localizaciones con alteraciones geotérmicas con circulación de fluidos.

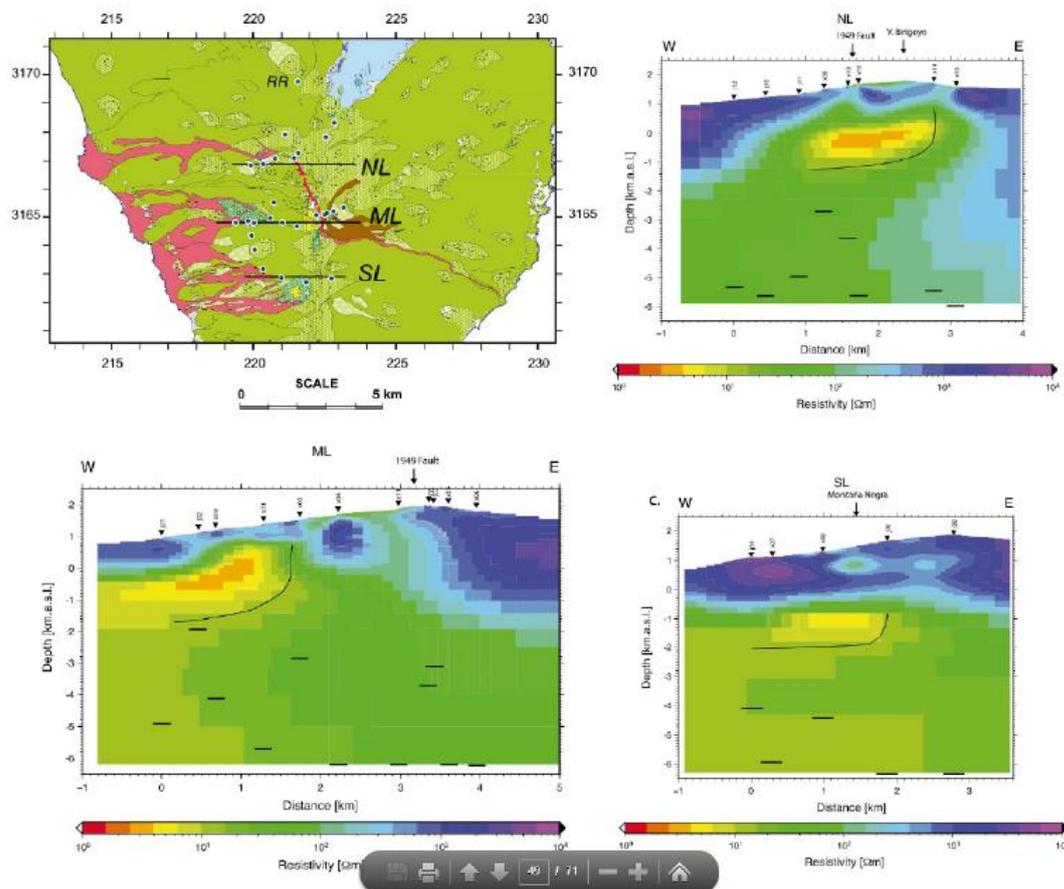


Figura 22. Modelo bidimensional de resistividad del estudio magnetoteléxico correspondiente a los tres perfiles de mediciones de la zona oeste de Cumbre Vieja. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias.*

En estudios posteriores, de autopotencial y de Audio-MT, se llegó a una conclusión similar a la anterior. En el flanco oeste se observa un incremento de los valores de potencia, probablemente debidos a una capa impermeable que permite guiar la circulación de aguas

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

subterráneas. Asimismo, como los resultados de ambos estudios son similares, se puede determinar que existe un sistema geotérmico.

En el año 2020 se efectuaron nuevos estudios de inversión magnetotelúrica 3D, que se han considerado los más fundamentales en La Palma. Han sido desarrollados por INVOLCAN, la Universidad de Barcelona, el ITER y la Agencia Insular de Energía de Tenerife (AIET). (ITC, 2020).

Estos trabajos están fundamentados en mediciones magnetotelúricas (MT), capaces de revelar estructuras internas del subsuelo, y a partir de la resistividad eléctrica medida, poder comprender las estructuras geológicas. Se ha contado con estaciones de medida situadas en 44 lugares que se distribuyen alrededor de la isla. Con ello, se observa que la resistividad en las zonas del subsuelo de la cordillera de Cumbre Vieja es menor.

La reducida resistividad del sur de la isla representa valores que se relacionan con materiales arcillosos que están generados por la circulación de fluidos geotérmicos a través de fisuras permeables. Esto conduce a una modificación hidrotermal en las rocas del subsuelo. (El Time, 2020).

En la figura 23, los puntos negros de la subfigura (a) significan las estaciones de medida utilizadas. En cambio, los puntos blancos y negros de la subfigura (b) representan las densidades en las diferentes zonas de la isla a unos 2 km de profundidad.

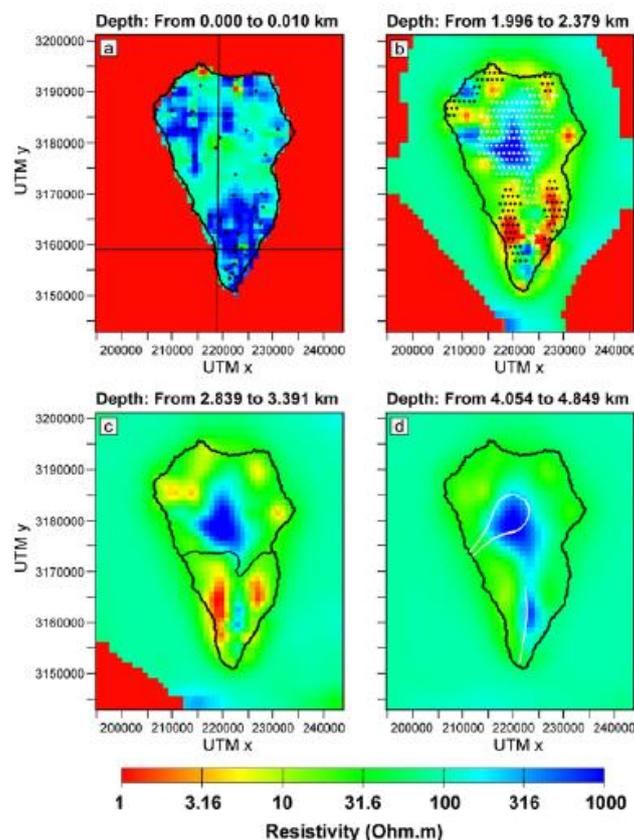


Figura 23. Representación del modelo de resistividad 3D a distintas profundidades. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

De acuerdo a todos los estudios realizados se puede concluir que el recurso geotérmico de La Palma es de alta temperatura y se encuentra, en su mayor parte, en los costados este y oeste de la cordillera de Cumbre Vieja y algo desplazado hacia el oeste. En la figura 24 se observan, a nivel nacional, los posibles recursos según su temperatura. En La Palma se localiza un posible recurso en la zona del sur, con una profundidad de hasta 1.000 m y una temperatura de entre 150 y 250 °C.

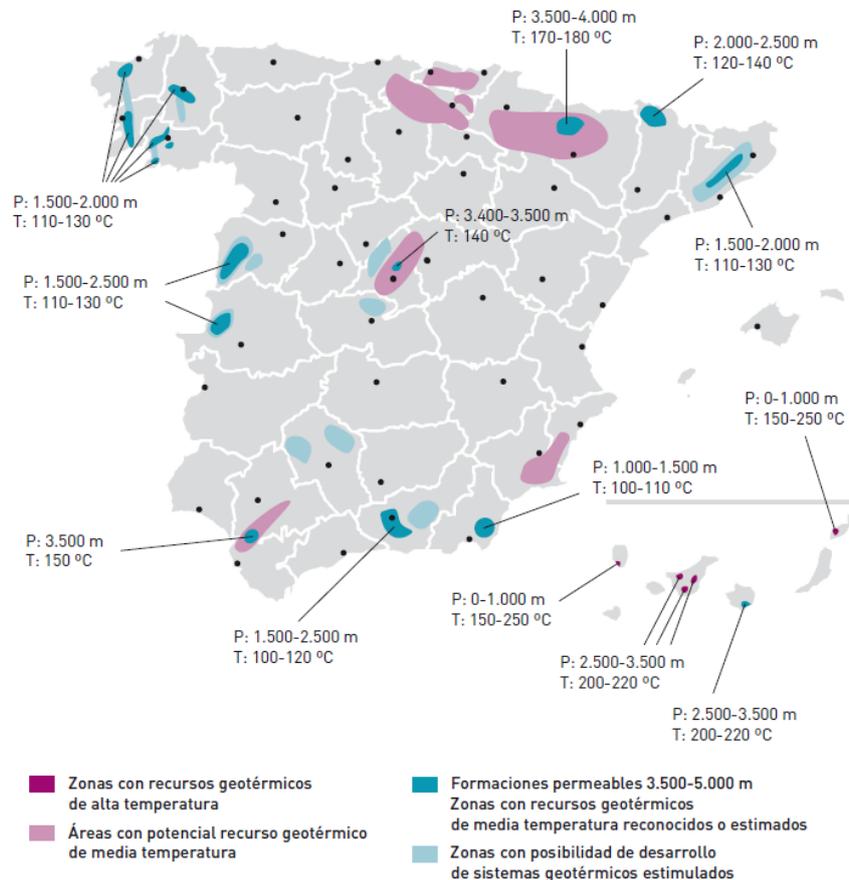


Figura 24. Mapa de recursos geotérmicos de España. Fuente: IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*.

5.2. TIPO DE PLANTA GEOTÉRMICA A DISEÑAR.

El análisis de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma indica que existen zonas de alta temperatura en las que la generación eléctrica con centrales geotérmicas es posible.

El tipo de tecnología de planta geotérmica que conviene utilizar es la central de tipo Flash, debido a que lo más probable es que se obtenga una mezcla de líquido-vapor en el fluido geotérmico. Además de esto, son las plantas geotérmicas más comunes y más adecuadas para aprovechar los recursos geotérmicos a altas temperaturas y adquirir una potencia mayor.

Sus potencias se encuentran en un rango entre 3 y 117 MW. La media de capacidad de las centrales flash existentes es de 27 MW.

5.2.1. Aspectos de diseño de la central.

Las plantas geotérmicas flash basan su funcionamiento en un fluido geotermal que se encuentra en un estado de mezcla líquido-vapor a una presión que depende de la profundidad del pozo de producción y de la temperatura de saturación.

Ocurre el proceso de flash en el que un líquido presurizado se transforma en la mezcla líquido-vapor debido a la reducción de la presión del fluido por debajo de la de saturación. Este proceso puede darse en el yacimiento al tiempo en el que el fluido atraviesa la formación permeable con la caída de presión que conlleva, en el pozo de producción debido a la pérdida de presión, o en la entrada al separador ciclónico en el que se requiere un estrangulamiento del fluido para dividir las dos fases.

- **Sistema de recolección de vapor.**

Conseguir que el vapor llegue a la central geotérmica es algo esencial para que el sistema funcione. Para ello, los pozos de producción y de inyección se suelen perforar en lugares distribuidos alrededor del terreno. Los pozos de producción son necesarios para recoger el fluido geotérmico en el estado de líquido-vapor, mientras que con los pozos de inyección se introduce el fluido condensado en el recurso geotérmico.

Es necesaria la instalación de un sistema de tuberías que recolecte el fluido geotérmico desde los pozos de producción y poderlo conducir hasta la propia central donde se produce la electricidad.

En cualquier caso, se requieren separadores que dividen las fases, líquida y vapor, del fluido con una mínima pérdida de presión, formados por recipientes de presión ciclónico y cilíndrico. Estos separadores ciclónicos pueden estar situados en la sala de máquinas de la central, en estaciones satélite distribuidas por el terreno o en las bocas de pozo. En los dos últimos casos se requieren receptores de vapor antes de la sala de máquinas.

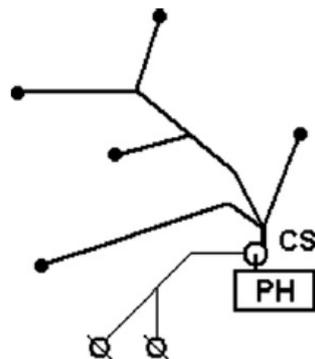


Figura 25. Sistema de recolección con el separador ciclónico (CS) en la sala de máquinas (PH). Puntos negros = Pozos de producción. Puntos blancos = Pozos de inyección. Fuente: DiPIPPo, R. (2012). *Geothermal Power Plants*.

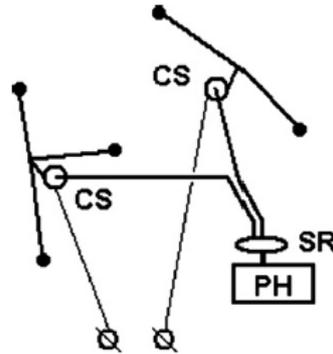


Figura 26. Sistema de recolección con estaciones de separadores satélite y un receptor de vapor (SR) antes de la sala de máquinas de la central. Fuente: DIPIPO, R. (2012). *Geothermal Power Plants*.

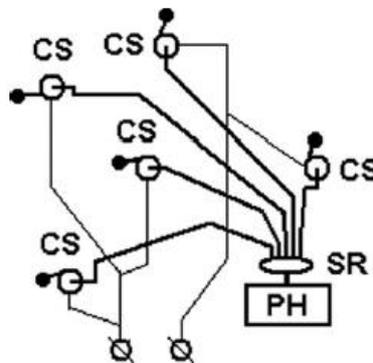


Figura 27. Sistema de recolección con separadores de vapor individuales en cada boca de pozo de producción. Fuente: DIPIPO, R. (2012). *Geothermal Power Plants*.

Un aspecto que se debe tener en cuenta es la pérdida de presión en las tuberías que transportan el vapor desde las bocas de pozo hasta la sala de máquinas. Esta caída de presión se produce en función del diámetro, la longitud y la configuración que tenga la tubería. Además, el flujo másico y la densidad que tenga el vapor circulante también influyen. No obstante, la variable que más interviene en la pérdida de presión es el diámetro de la tubería. Cuanto mayor sea el diámetro, menor pérdida de presión habrá.

Sin embargo, si hay dos fases en la tubería, líquido y vapor, predecir analíticamente la pérdida de presión es más complicado debido a que la relación de las fases del fluido puede cambiar. Por este motivo, se suelen llevar a cabo pruebas experimentales de campo para determinar la pérdida de presión en distintas situaciones en las que se encuentre el fluido geotérmico.

- **Sistema de conversión de energía.**

Una vez se consigue aislar el vapor en los separadores ciclónicos, este debe llegar a la turbina. Existen diversos equipos en cada pozo de producción para asegurar unas buenas condiciones del vapor que alcanza la sala de máquinas. En este conjunto de equipos se encuentran válvulas

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

(WV), un silenciador (S) que se incluye en el separador ciclónico para emergencias que requieran ventilación, tuberías, medidores de presión y de temperatura.

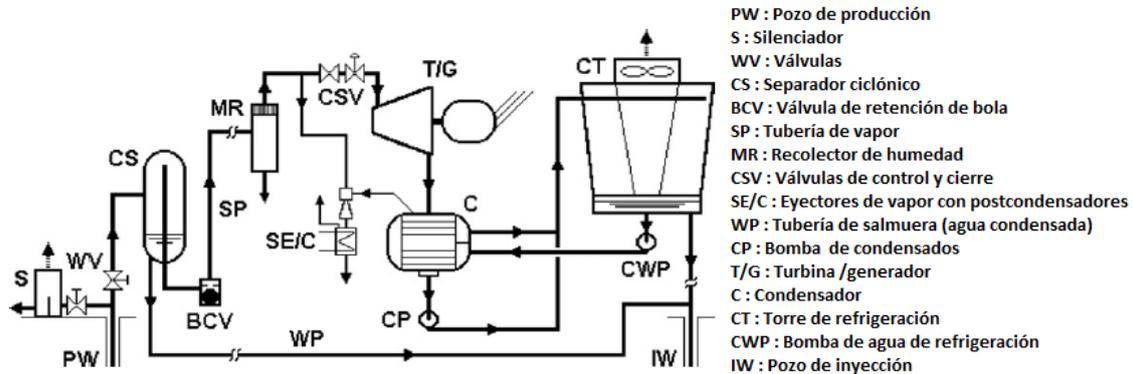


Figura 28. Esquema de funcionamiento de una central flash. Fuente: DIPIPPO, R. (2012). *Geothermal Power Plants*.

El fluido condensado en el separador se envía al pozo de inyección para ser introducido de nuevo en el recurso geotérmico. Mientras tanto, el vapor recorre las tuberías que lo conducen hasta la turbina. Estas tuberías se denominan de transmisión y contienen trampas que eliminan la humedad que se forma con la condensación del vapor en las paredes de la tubería. Antes de alcanzar la casa de máquinas donde se sitúa la turbina, el vapor atraviesa un eliminador de humedad (MR).

Cuando el vapor es lo más puro posible se introduce en la turbina de vapor. La presencia de distintos materiales corrosivos en el vapor, como el ácido sulfhídrico (H_2S), provoca que los materiales de construcción de la turbina y otros elementos deban ser resistentes a la corrosión para evitar averías y deterioro. Normalmente, se suelen utilizar aleaciones de acero con un 12% de cromo, como los tipos AISI 403/410 o AISI 405.

El vapor entra en la turbina geotérmica a una presión de entre 5 y 10 bar. Al tener una presión relativamente baja, su funcionamiento es similar al de una central nuclear.



Figura 29. Detalle de una turbina de vapor en proceso de instalación en la central geotérmica de San Jacinto Tizate, en Nicaragua. Fuente: ORMAD, A. (2012). *Novedades en el proyecto de San Jacinto Tizate*.

Para centrales geotérmicas de tipo flash, las turbinas de vapor suelen tener una potencia nominal de entre 25 y 55 MW y se componen de 4 a 5 etapas de álabes de impulso y reacción. Los rendimientos isoentrópicos son de aproximadamente un 80%. Esto permite que el conjunto de turbina y generador eléctrico consiga una buena eficiencia en la producción de energía eléctrica.

Como se puede observar en la figura 28, existe un condensador de superficie (C) que almacena el vapor condensado en la turbina. Por otra parte, los gases no condensables se sitúan junto al vapor, como el CO₂ y el H₂S, que permanecen en el circuito al no condensar con las temperaturas a las que opera el condensador. Por consiguiente, se eliminan al emplear eyectores de chorro de vapor (SE/C), y también es posible utilizar bombas de vacío.

Además, en la torre de refrigeración se recircula una parte del vapor que se ha condensado después de reducir su temperatura, lo que permite utilizar menores cantidades de agua, lo que es una ventaja en casos donde el agua sea un bien escaso.

5.2.2. Equipos de la central geotérmica.

En este apartado se presentan algunos de los equipamientos de los que se componen las centrales geotérmicas de tipo flash. Permiten que el funcionamiento de la planta sea óptimo.

- **Sistema de suministro de salmuera y vapor en la boca de pozo.**
 - Las válvulas y los controles en la boca de cada pozo de producción son necesarias para prevenir posibles reventones durante la perforación.
 - Recipientes separadores ciclónicos verticales, que consiguen descargar el vapor y darle salida para que llegue a la central, y almacenar agua líquida mediante un tanque integrado o externo.
 - Válvulas de bola para retención.
 - Tubería de vapor con aislamiento y soportes, además de trampas de escape de los condensados y bucles de expansión.
 - Recolector de vapor.
 - Eliminador de humedad.
 - Silenciadores de descarga para reducir la transmisión del ruido que produce el fluido circulante.
 - Tubería de salmuera con aislamiento y soportes.

- **Conjunto turbina – generador y controles.**
 - Turbina de vapor: Turbina de impulso y reacción de varias etapas con eliminador de humedad entre etapas, rotor, estator, álabes, sistema de lubricación, sistema de refrigeración.
 - Generador eléctrico síncrono de dos o de cuatro polos.

- Sistema de control formado por un ordenador que permite una constante recopilación de datos. Es programable y tiene una automatización completa.
- Compresor de aire con una o dos etapas, impulsado por motor.

- **Condensador, eyección de gas y control de la contaminación.**
 - Condensador: Puede ser de contacto directo/de superficie, o barométrico/de chorro de bajo nivel. El material para las superficies húmedas es acero inoxidable.
 - Bombas de condensado: Bombas centrífugas verticales.
 - Motores de condensado: Dos unidades que operan al 100% de capacidad.
 - Sistema de eliminación de gases: Eyectores de chorro de vapor, turbocompresores o eyector/compresor híbrido.
 - Sistema de tratamiento NCG: Eliminación de gases no condensables.

- **Sistema de expulsión de calor.**
 - Torre de refrigeración: De multicelda, de tiro inducido mecánicamente, de contraflujo, o de flujo cruzado. Los materiales de construcción son ignífugos.
 - Bombas del agua de refrigeración: Bombas centrífugas verticales de pozo húmedo. Material para las superficies húmedas es acero inoxidable. Impulsadas por motores eléctricos.
 - Sistema de tratamiento de agua de refrigeración: Se añaden aditivos para mantener el pH del agua entre 6,5 y 8.

- **Sistemas de back-up o respaldo.**
 - Fuente de alimentación de reserva desde la red o con un generador diesel.

- **Sistema de reducción de ruido.**
 - Aislamiento acústico utilizado en componentes que produzcan ruido en el empleo de los fluidos.

- **Sistema de eliminación de fluidos geotérmicos.**
 - Pozos de inyección, donde se introduce el exceso de condensados y también la purga de la torre de refrigeración.
 - Estanques impermeables para depositar salmueras y condensados de forma temporal.

6. ÁMBITO DE APLICACIÓN Y RANGO DE SOLUCIONES

6.1. ESTUDIO ENERGÉTICO DE LA PALMA.

Dimensionar el sistema eléctrico de la isla es un requerimiento para integrar una nueva tecnología en la producción de electricidad. La energía geotérmica puede ampliar el rango de energías renovables en el sistema que cubre la demanda eléctrica, y permitir la reducción de los combustibles fósiles empleados en la actualidad.

6.1.1. Demanda de potencia.

Conocer la cantidad de potencia que se demanda en la isla proporciona una idea sobre la energía real que se consume al generar la electricidad. Asimismo, la demanda de potencia horaria consiste en una distribución de los datos más detallada a lo largo del día.

El mayor consumo de energía eléctrica, generalmente, ocurre en los meses de invierno, debido a la menor cantidad de horas de luz y a las bajas temperaturas, y también en los meses de verano, en los que como la temperatura es alta, se emplea más la climatización en determinados lugares para contrarrestar el calor. En base a esto, se escoge un día de invierno y otro de verano, para analizar la demanda de potencia de La Palma en estos casos más desfavorables.

- Día de invierno: 25 de enero.



Figura 30. Evolución de la demanda de energía real (curva amarilla), la demanda prevista (curva verde) y la programada (curva roja), el día 25 de enero de 2022. Fuente: REE (2022). *Sistema eléctrico canario. Demanda canaria en tiempo real.*

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Como se puede observar en la figura 30, el máximo de demanda de potencia en un día de invierno es de 38 MW, a las 20:27 horas. Por otra parte, la mínima demanda se da en las horas de la madrugada, a las 03:18 horas en este caso, con un valor de 18,7 MW.

- Día de verano: 20 de julio.

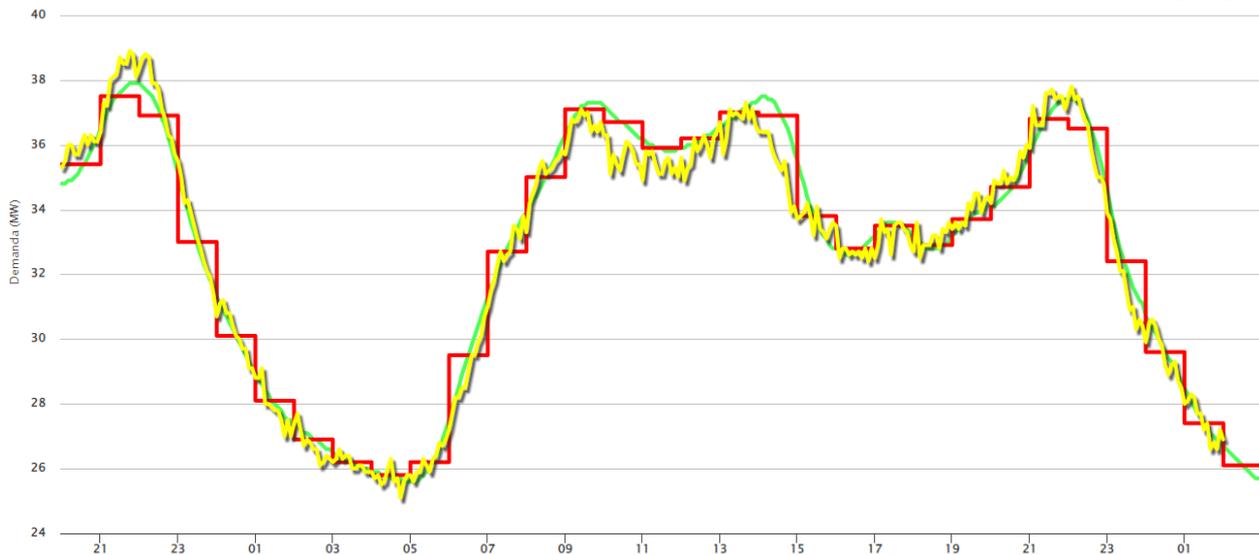


Figura 31. Evolución de la demanda de energía real (curva amarilla), la demanda prevista (curva verde) y la programada (curva roja), el día 20 de julio de 2021. Fuente: REE (2022). *Sistema eléctrico canario. Demanda canaria en tiempo real.*

En los días de verano, el consumo energético suele ser parecido a los de invierno, dada la reducida variación de las temperaturas a lo largo del año, aunque los horarios de consumo cambian.

Se puede comprobar en la figura 31 una forma de curva similar a la figura 30. Se produce un pico de demanda a las 22:01 horas, de 38 MW, mientras que el mínimo de demanda diaria es de 24,9 MW a las 04:30 horas. Además, por la mañana, se origina un consumo más elevado que alcanza los 37 MW a las 09:30 horas.

Estos datos permiten conocer la demanda máxima de potencia, la cual ronda los 38 MW, que es esencial cubrir. También se debe garantizar que el consumo energético sea el adecuado en cada momento del día.

6.1.2. Producción de energía.

Las tecnologías encargadas, actualmente, de generar la energía eléctrica en la isla de La Palma son la energía termoeléctrica convencional, la energía eólica y la energía solar fotovoltaica. Sin embargo, la proporción de la eólica y la fotovoltaica es mucho más reducida que la energía aportada por la central térmica diésel. Como se puede observar en la figura 32, a las 14:00 horas hay una producción elevada de energías renovables, pero no alcanza el 20% del total.

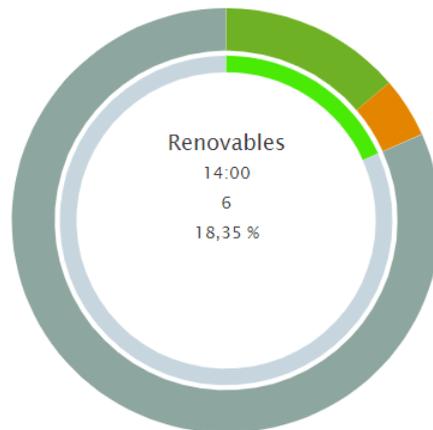


Figura 32. Proporción de energías renovables a las 14:00 horas del día 18 de junio de 2022 en la demanda total. Central térmica (gris), energía eólica (verde) y solar fotovoltaica (naranja). Fuente: REE (2022). *Sistema eléctrico canario. Demanda canaria en tiempo real.*

- **Central Térmica Diésel.**

La mayor parte del consumo de energía de la isla procede de la Central Térmica de Los Guinchos. Tiene la capacidad de abastecer toda la demanda de potencia durante el día debido a su potencia total de 105,3 MW. Utiliza combustible diésel importado, y por ello, supone un gasto económico. (Wikipedia, 2022).

Asimismo, tiene un porcentaje de producción de entre un 85-93%, que varía según la aportación de las otras tecnologías. Normalmente, debido a que la potencia demandada por La Palma es menor a su capacidad total, suele operar a una potencia de entre 28-35 MW aproximadamente, con la utilización de un menor número de grupos electrógenos.

- **Energía Eólica.**

La energía eólica también forma parte del sistema eléctrico de La Palma. Sin embargo, su aportación de potencia es todavía reducida. La potencia que suele cubrir se sitúa entre un 8-12% del total, aunque este dato es variable dependiendo del día. Con ello, se aporta una potencia de entre 2 y 3,5 MW.

- **Energía Solar Fotovoltaica.**

La producción de la energía solar fotovoltaica tiene un valor casi despreciable a causa de la reducida potencia instalada de esta tecnología que se destina a la red. Además, la ausencia de luz solar hace que las horas de operación sean reducidas, por lo que suele funcionar dese las 09:00 horas hasta las 20:00 horas aproximadamente.

A pesar de esto, suele encontrarse entre un 2,5% y un 5% de la producción total en los días soleados, durante algunas horas. Esto representa alrededor de 0,8 MW y 1,6 MW de producción solar fotovoltaica. (REE, 2022).

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

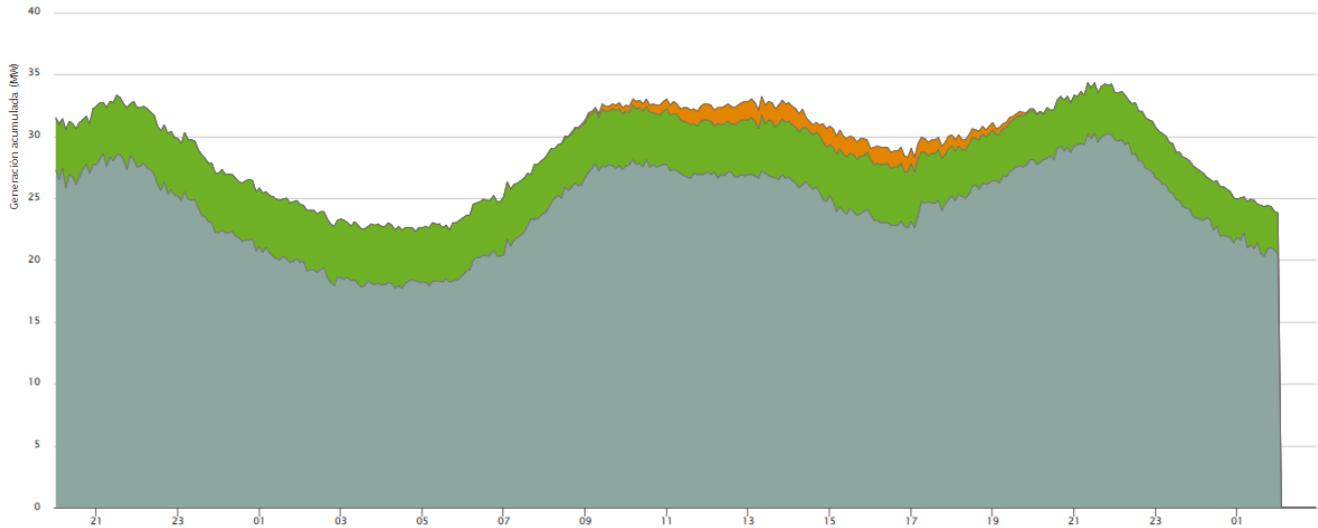


Figura 33. Generación acumulada de las diferentes tecnologías: Central térmica (gris), energía eólica (verde) y energía solar fotovoltaica (naranja), el día 18 de junio de 2022. Fuente: REE (2022). *Sistema eléctrico canario. Demanda canaria en tiempo real.*

6.2. POTENCIA DE LA CENTRAL GEOTÉRMICA.

Al conocer la demanda de potencia de la isla en distintas estaciones, se puede saber que el consumo de energía es similar durante todos los días del año. Asimismo, se conoce que el máximo de potencia demandada se encuentra alrededor de 38 MW, lo que constituye información para poder dimensionar la central geotérmica según las necesidades.

Para elegir una potencia razonable para la central, hay que tener en cuenta también el rango de potencias que suelen tener las centrales geotérmicas de tipo flash. Estas tienen una capacidad media de 27 MW, y existen centrales de entre 3 y 117 MW.

Si se supone que el recurso geotérmico de La Palma tiene un potencial medio-alto, tal y como se describe en los estudios realizados, sería posible establecer una potencia de la central geotérmica alrededor de la media, e incluso pudiéndose superar.

Al tener en consideración estos argumentos, además de los análisis realizados anteriormente, se puede instaurar una potencia de la central geotérmica Flash en torno a los 30 MW de potencia.

En este caso, sería factible abastecer gran parte de la demanda de la isla de La Palma. Si la central opera a máxima potencia, en las horas donde la demanda es mayor, podría cubrir alrededor de un 80% de la demanda, y un 100% en las horas con una demanda de potencia más reducida, incluso pudiendo disminuir la potencia en algunos momentos del día.

Asimismo, el consumo energético sería generalmente de origen geotérmico y, como consecuencia, renovable.

6.3. POSIBLES LOCALIZACIONES.

Al buscar emplazamientos donde sea viable realizar la instalación de una central geotérmica se deben tener presentes los estudios de los recursos geotérmicos y también, la normativa medioambiental y territorial existente.

Los estudios que se han realizado han delimitado algunas zonas de alta permeabilidad en las que es posible encontrar el recurso geotérmico, como se observa en la figura 34, y son aptas para realizar las perforaciones.

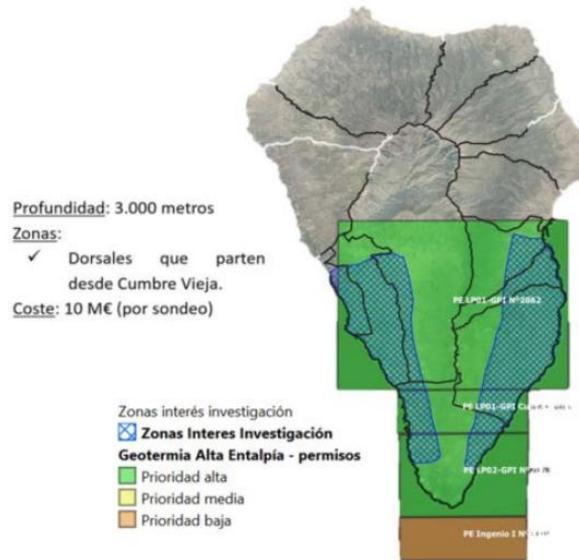


Figura 34. Zonas prioritarias para realizar sondeos. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias.*

Más adelante, se realiza una clasificación de las zonas que están libres de restricciones del territorio y del medioambiente. Esto permite obtener un conjunto de localizaciones aptas para instalar una central geotérmica.

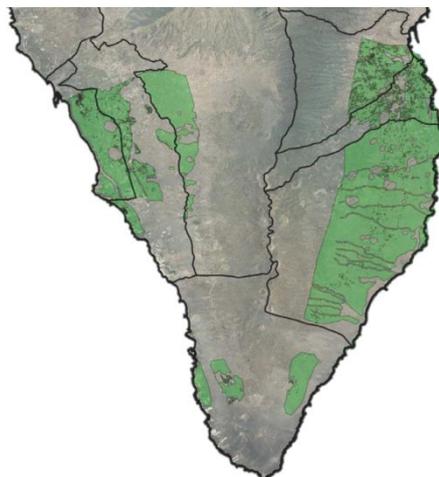


Figura 35. Situaciones que cumplen con restricciones ambientales y territoriales, dentro de las zonas prioritarias de los sondeos. Fuente: ITC (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias.*

Una vez se conocen las zonas en las que sería razonable instalar la central, se pueden proponer algunas localizaciones distribuidas alrededor de estas zonas aptas.

- **Las Caletas, Fuencaliente.**

Una opción es instalar la planta geotérmica en el municipio de Fuencaliente, al sur de La Palma. En este, la zona cercana a Las Caletas es de las más idóneas, al no tener cerca demasiada población. Se trata de un terreno con una pendiente relativamente pronunciada, que contiene algo de vegetación y en la que no se da una actividad alta por parte de la población.

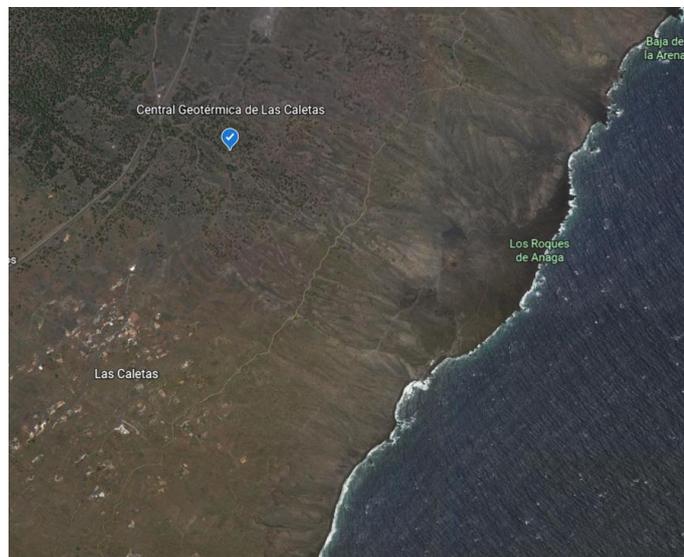


Figura 36. Localización de una posible planta geotérmica cerca de Las Caletas, Fuencaliente. Fuente: Propia.

- **Lomo Oscuro, Villa de Mazo.**

En segundo lugar, en el municipio de Villa de Mazo, al noreste del anterior, se sitúa otro lugar con potencial para albergar una planta geotérmica, cerca de Lomo Oscuro.

Se trata de una localización similar a la anterior, con un terreno en pendiente. En cambio, abarca menor cantidad de vegetación y se encuentra poco habitada, por lo que el tránsito de población es reducido.

Por otra parte, al encontrarse en una ubicación que se encuentra algo más al centro de la isla, las instalaciones de transporte de la energía eléctrica producida estarían más equilibradas.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma



Figura 37. Ubicación de una central geotérmica en Lomo Oscuro, Villa de Mazo. Fuente: Propia.

- **Tacande, El Paso.**

Una tercera zona en la que se podría instalar una central geotérmica es Tacande, en el municipio de El Paso.

Se localiza en un lugar con mayor número de habitantes y por ello, la central estaría menos aislada, lo que supone una limitación. El terreno es más llano y no tiene mucha vegetación cerca. Al estar en el centro de la isla, el transporte de la electricidad estaría mejor distribuido hacia el resto de municipios.

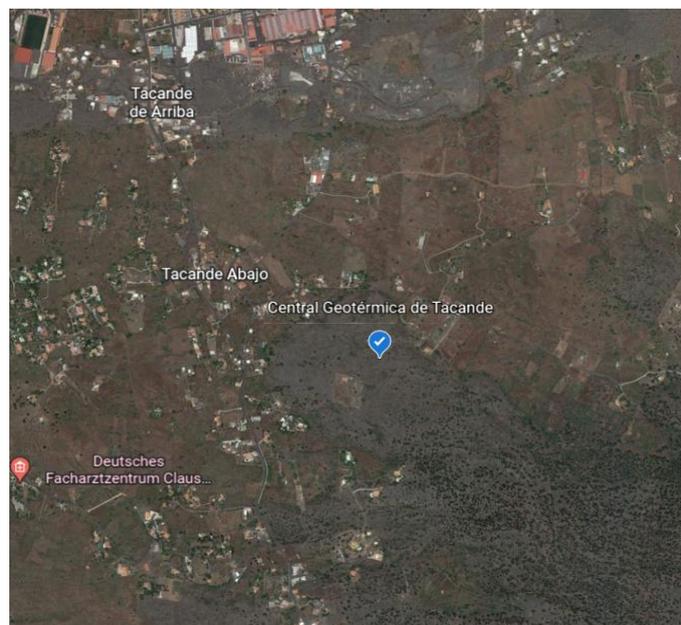


Figura 38. Situación de una posible central geotérmica en Tacande, El Paso. Fuente: Propia.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

La ubicación de los tres lugares analizados se puede distinguir de una forma más exacta en la figura 39, en la que se observa una vista de la isla desde el suroeste.

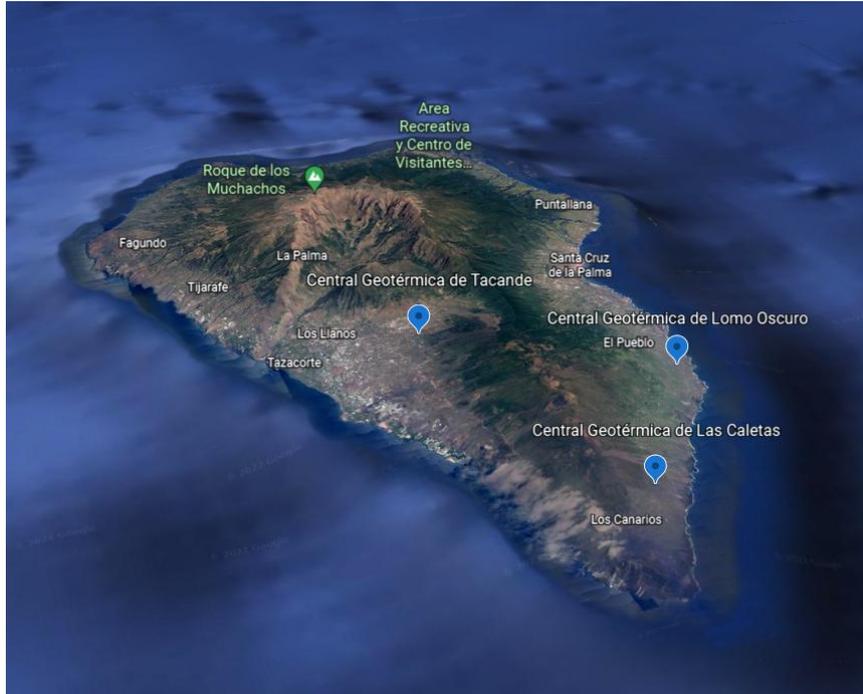


Figura 39. Localizaciones de la posible instalación de una central geotérmica de alta entalpía en la isla de La Palma. Fuente: Propia.

En la siguiente tabla 2 se especifican, de manera aproximada, algunas características de los posibles emplazamientos en función de si las condiciones de cada una son buenas, marcadas en verde, o malas, marcadas en rojo.

Tabla 2. Clasificación de las características de los emplazamientos.

Emplazamiento	Accesos	Adecuación del terreno	Impacto ambiental	Impacto población	Conexión a la red eléctrica
Las Caletas					
Lomo Oscuro					
Tacande					

Se puede concluir que las localizaciones son favorables, aunque las dos primeras necesitan líneas de distribución de la electricidad mayores al encontrarse en lugares más aislados. En cambio, en Tacande se produce un mayor impacto ambiental y visual al encontrarse en una zona más concurrida, y con ello, mayor impacto en los habitantes de lugar.

7. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Efectuar un análisis de la viabilidad económica del proyecto aporta información relevante acerca de las inversiones, gastos y ganancias que tienen lugar en el tiempo en el que la central geotérmica está en construcción y en operación.

Además, se proceden a evaluar cuatro aspectos económicos, que son el flujo de caja, el plazo de recuperación, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

7.1. INVERSIONES Y GASTOS.

En este apartado se efectúa una clasificación de los tipos de inversiones que se realizan al principio del proyecto, y también se incluyen gastos que tienen lugar cuando la central está en funcionamiento y con producción eléctrica.

Para ello, se utilizan ratios de la inversión a realizar por unidad de potencia (€/MW). Asimismo, los costes se representan según la potencia establecida de la planta, que son 30 MW. (MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P., 2018).

7.1.1. Costes de inversión inicial.

Se realiza un desglose de los costes de inversión iniciales que se deben llevar a cabo en la puesta en marcha del proyecto, como se observa en la tabla 3. En el ratio del desarrollo de pozos, se contabilizan 7 pozos, 5 de producción y 2 de inyección.

Tabla 3. Costes de inversión.

Costes capitales	Ratio de inversión (€/MW)	Inversión (€) (P = 30 MW)
Exploración	65.000	1.950.000
Desarrollo de pozos	475.000	14.250.000
Equipos de la planta	850.000	25.500.000
Permisos del uso del terreno	10.000	300.000
Interconexión	5.200	156.000
Gastos generales	148.000	4.440.000
Intereses en la construcción (6%)	93.192	2.795.760
Contingencias (6%)	93.192	2.795.760
Total	1.739.584	52.187.520

7.1.2. Costes de operación.

En los costes de operación, el hecho de utilizar los equipos y sistemas de la planta para que cumplan su función, también representa un gasto que se puede expresar en función de la capacidad de la central. (MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P., 2018).

Tabla 4. Gastos de los equipos de la planta geotérmica.

Planta geotérmica	Ratio de inversión (€/MW)	Inversión (€) (P = 30 MW)
Turbina/generador	462,96	13.888,80
Sistemas eléctricos y de control	796,30	23.889
Sistemas de refrigeración	111,11	3.333,30
Sistemas auxiliares	240,74	7.222,20
Agua de refrigeración y productos químicos	870,37	26.111,10
Consumibles	925,93	27.777,90
Total	3.407,41	102.222,30

Para que los pozos puedan tener una operación óptima se deben llevar a cabo una serie de medidas como la aplicación de compuestos y productos que limpian y mejoran el flujo del fluido geotérmico. Este coste se expresa en función de la potencia con el ratio de inversión. (MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P., 2018).

En el gasto de los pozos se contabilizan, al igual que en coste de inversión del desarrollo de pozos, 7 pozos, de los cuales 5 son de producción y 2 son de inyección.

Tabla 5. Gastos en los pozos de producción e inyección.

Pozos	Ratio de inversión (€/MW)	Inversión (€) (P = 30 MW)
Limpieza del pozo	1.703,70	51.111
Productos químicos de salmuera	925,93	27.777,90
Misceláneos	648,15	19.444,50
Total	3.277,78	98.333,40

En los costes de operación se incluyen los gastos en la mano de obra que participa en la central. Representan salarios mensuales y anuales aproximados, que dependen de la función que se tenga en la operación de la planta geotérmica. (MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P., 2018).

Tabla 6. Gastos en la mano de obra.

Mano de obra	Ratio de inversión (€/mes)	Inversión (€) (12 meses)
Gerente de planta	5.600	67.200
Operarios de planta (8)	19.200	230.400
Mecánicos	2.400	28.800
Otras labores	2.000	24.000
Total	29.200	350.400

7.1.3. Costes de mantenimiento.

Las reparaciones de mantenimiento que se deben realizar al cabo de un tiempo determinado también integran un gasto que hay que asumir.

Algunas de estas reparaciones se realizan cada cierto tiempo, generalmente, cada 3 años en los componentes de la planta, cada 2 años en lo que respecta al mantenimiento del pozo, y el reemplazo de los pozos que se encuentran en operación se ejecuta a los 5 años de utilización. Sin embargo, los gastos representados en la tabla 7, están expresados según el coste anual. (MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P., 2018).

Tabla 7. Gastos en las grandes reparaciones.

Grandes reparaciones	Ratio de inversión (€/MW)	Inversión (€) (P = 30 MW)
Planta (cada 3 años)	4.777,77	143.333,10
Mano de obra	400	12.000
Materiales	4.629,63	138.888,90
Mantenimiento del pozo (cada 2 años)	462,96	13.888,80
Sustitución del pozo (cada 5 años)	8.518,52	255.555,60
Total	18.788,88	563.666,40

El hecho de mantener el recurso geotérmico en buenas condiciones también representa una inversión. Asimismo, el uso del agua es algo fundamental en cuanto a la extracción del recurso y por ello, hay que efectuar un uso sostenible.

Además, hay que tener en cuenta las cuotas de los contratos de arrendamiento del terreno en el que se instala la central. (MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P., 2018).

Tabla 8. Gastos en el recurso geotérmico.

Recurso geotérmico	Ratio de inversión (€/MW)	Inversión (€) (P = 30 MW)
Beneficios para la comunidad (3% de la venta de electricidad)	2.839,25	85.177,50
Manejo de reservas	462,96	13.888,80
Uso del agua	120,37	3.611,10
Cuotas de arrendamiento del suelo	103,70	3.111
Total	3.526,28	105.788,40

Las inversiones iniciales que se deben llevar a cabo son de 52.187.520 euros, mientras que los costes de operación y mantenimiento anuales representan una cantidad de unos 1.220.410 euros.

7.2. INGRESOS.

Los ingresos que se consiguen una vez que la central geotérmica está en operación provienen de la energía eléctrica vendida para su utilización y, además de esto, se incluyen las retribuciones a las energías renovables.

7.2.1. Venta de energía y precio de la electricidad.

La energía eléctrica que se produce en la central geotérmica anualmente es vendida para su uso en los diferentes puntos de consumo de electricidad de la isla de La Palma. Esta cantidad de energía se puede calcular en función de las horas anuales de funcionamiento de la central y de la potencia media a la que opere durante el año.

Para calcular la energía producida anualmente, se supone que la central opera a la máxima potencia de 30 MW durante 5.100 horas, que son las horas equivalentes de funcionamiento de una instalación modelo de energía geotérmica. (BOE, 2020).

Energía eléctrica anual = Potencia · Tiempo de funcionamiento = 30 MW · 5.100 h
= **153.000 MWh.**

Se producen al año 153.000 MWh de energía eléctrica en la central geotérmica para el consumo de la isla. Por tanto, en un mes se producirían unos 12.750 MWh. Este dato es menor que la energía disponible en la isla de La Palma en el mes de mayo de 2022, que es de 19.011,29 MWh. (ISTAC, 2022)

Esta energía se debe vender al precio medio de la generación eléctrica y en cada sistema eléctrico de las islas de Canarias varía a lo largo del tiempo. En el caso de La Palma, se obtiene un precio medio de venta en los años 2021 y 2022, de 214 €/MWh. Este alto precio es debido a una reducida variedad de tecnologías generadoras de energía eléctrica. (OECAN, 2022).

Sin embargo, este precio de venta se abarataría considerablemente si la fuente de generación principal fuera renovable, como la geotérmica. En esta situación, el precio de venta de la energía al sistema en el año 2022 es de 43,29 €/MWh. Por tanto, estos ingresos se calculan de la siguiente manera. (BOE, 2020).

Ingresos por venta de energía = Energía generada · Precio medio de venta = 153.000 MWh · 43,29 €/MWh = **6.623.370 €.**

Producir energía eléctrica con una central geotérmica permite adquirir unos ingresos de aproximadamente 6,62 M€ cada año.

7.2.2. Retribuciones.

De acuerdo con el Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, las energías renovables que producen electricidad tienen unas subvenciones determinadas que permiten una mayor velocidad de

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

implantación en los sistemas eléctricos, puesto que aumentan las posibilidades de invertir en estas fuentes de energía.

Los parámetros retributivos de instalaciones tipo que están aplicados a los años 2020, 2021 y 2022 están recopilados en el anexo II de este Real Decreto. A excepción de la retribución a la operación, son las que se describen a continuación:

- $\text{Retribución instalación} = \text{Retribución venta} + \text{Retribución específica}$
- $\text{Retribución específica} = R_{\text{inv}} + R_{\text{o}} + I_{\text{inv}}$
 - R_{inv} (Retribución a la inversión): Término por unidad de potencia que iguala los costes de inversión de la instalación tipo no recuperadas por la venta de energía en el mercado.
 - R_{o} (Retribución a la operación): Término que cubre la diferencia que hay entre los costes de explotación de la instalación tipo y los ingresos debidos a la venta de energía en el mercado previstos para la instalación tipo.
 - I_{inv} (Incentivo a la inversión): Instalaciones en sistemas eléctricos no peninsulares que supongan una reducción global del coste de generación.

En el caso de las instalaciones de energía geotérmica, no están completamente caracterizadas en la normativa, por lo que no se tienen en cuenta todas las retribuciones posibles. La subvención que se aplica el primer año es la retribución a la inversión: $R_{\text{inv}} = 212.444 \text{ €/MW}$. (BOE, 2020).

$\text{Retribución a la inversión} = \text{Potencia} \cdot R_{\text{inv}} = 30 \text{ MW} \cdot 212.444 \text{ €/MW} = \mathbf{6.373.320 \text{ €}}$.

7.3. ASPECTOS ECONÓMICOS.

El análisis de los siguientes parámetros económicos proporciona información relevante para evaluar la viabilidad económica de la central geotérmica. Cuanto antes sea posible recuperar la inversión realizada se adquiere una mayor seguridad en poder amortizar el capital invertido. Con ello, existe una mayor probabilidad de comenzar el proyecto dado.

Se lleva a cabo un resumen, en la tabla 9, de los parámetros que se van a utilizar, como son la inversión inicial, los costes de operación y mantenimiento de la central y los ingresos anuales. Además, la potencia y la producción de energía se consideran constantes cada año.

Tabla 9. Resumen de ingresos y gastos en la central geotérmica.

Años	Potencia nominal (MW)	Generación eléctrica (MWh)	Inversión inicial (€)	Operación y mantenimiento (€)	Ingresos (€)
Primer año	30	153.000	52.187.520	1.220.410	12.996.690
Resto	30	153.000	0,00	1.220.410	6.623.370

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Los ingresos del primer año son mayores al resto debido a que se añade la retribución a la inversión como ingreso. Asimismo, en el desembolso inicial se incluyen los costes de explotación.

7.3.1. Flujo de caja.

El flujo de caja representa las entradas y salidas de capital a lo largo de la vida útil de la planta geotérmica, que se considera de 25 años. Se utiliza para conocer el tiempo de amortización y la rentabilidad al final de la vida útil de la central.

Los flujos netos de caja son el resultado de la diferencia que hay entre ingresos y costes de cada año de operación y no se tiene en cuenta la inversión inicial en su obtención.

$$FNC = \text{Ingresos} - \text{Costes de mantenimiento y operación}$$

Tabla 10. Flujo de caja de la central geotérmica de 30 MW.

Años	Inversión (€)	Operación y mantenimiento (€)	Ingresos (€)	Flujo de caja neto sin tasa descuento (€)	Flujo de caja neto con 8% de tasa descuento (€)	Flujo de caja neto acumulado con 8% de tasa descuento (€)
1	-52.187.520	-1.220.410	12.996.690	11.776.280	10.903.963	-41.283.557
2	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	5.002.741	-36.280.816
3	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	4.632.168	-31.648.648
4	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	4.289.044	-27.359.604
5	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	3.971.337	-23.388.267
6	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	3.677.164	-19.711.103
7	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	3.404.781	-16.306.322
8	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	3.152.575	-13.153.747
9	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	2.919.050	-10.234.697
10	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	2.702.824	-7.531.873
11	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	2.502.615	-5.029.258
12	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	2.317.236	-2.712.022
13	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	2.145.589	-566.433
14	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.986.656	1.420.223
15	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.839.496	3.259.719
16	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.703.237	4.962.956
17	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.577.071	6.540.027
18	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.460.250	8.000.277
19	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.352.083	9.352.360
20	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.251.929	10.604.289
21	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.159.194	11.763.483
22	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	1.073.328	12.836.811
23	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	993.822	13.830.633
24	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	920.206	14.750.839
25	0.00	-1.220.410	6.623.370	5.402.960	852.043	15.602.882

Como se puede observar en la tabla 10, en la que están representados los flujos de caja de la central geotérmica, se obtiene una rentabilidad de **15.602.882 €** al terminar la vida útil de 25 años de la instalación.

Además, el plazo de recuperación o payback del capital invertido ocurre a los **13 años**. Es decir, la cantidad invertida se amortiza en 13 años de operación de la central geotérmica.

En la figura 40 se comprueba la evolución del flujo de caja gráficamente y se aprecia que el año en el que se recupera la inversión es el año 13. Con ello, en el año 14 comienza a haber un flujo positivo hasta llegar a los 15,60 M€ al final de la vida útil de la instalación.

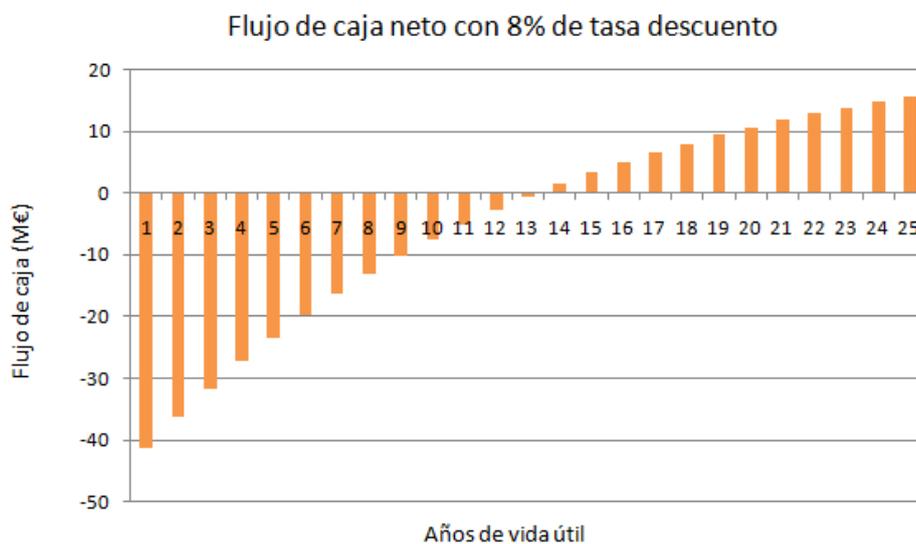


Figura 40. Evolución del flujo de caja neto a lo largo de la vida de la instalación. Fuente: Propia.

7.3.2. Valor actual neto (VAN) y Tasa interna de retorno (TIR).

Con el objetivo de evaluar el valor actual neto (VAN) para distintas tasas de descuento se realiza la tabla 11. Asimismo, se calcula la tasa interna de valor neto (TIR), que es igual a la tasa de descuento que hace que el VAN tenga un valor nulo.

El VAN se calcula con la siguiente fórmula de la figura 41, en la que se tiene en cuenta los valores del flujo de caja neto de cada año sin aplicar la tasa de descuento (FNC) y la inversión o desembolso inicial (D).

$$VAN = -D + \sum_{i=1}^n \frac{FNC_i}{(1 + K)^i}$$

Figura 41. Fórmula para el cálculo del Valor actual neto (VAN). Fuente: Propia.

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Siendo cada elemento:

- VAN: Valor actual neto.
- D: Inversión inicial.
- FNC_i: Resultado del ejercicio del año, sin aplicar tasa de descuento.
- K: Tasa de rentabilidad o de descuento.

La obtención de la TIR se realiza utilizando la fórmula de la figura 41, pero se iguala el VAN a cero. Con ello, el valor que se obtiene de K es el valor de la tasa interna de retorno (TIR). La expresión exacta que se aplica se representa en la figura 42.

$$0 = -D + \sum_{i=1}^n \frac{FNC_i}{(1+r)^i} \rightarrow r = TIR$$

Figura 42. Expresión para obtener la Tasa interna de retorno (TIR). Fuente: Propia.

Tabla 11. Determinación del VAN y de la TIR.

Tasa de Descuento (%)	VAN (€)
0	89.259.800
1	73.112.927
2	59.545.287
3	48.082.709
4	38.346.145
5	30.031.327
6	22.893.008
7	16.732.698
8	11.389.091
9	6.730.567
10	2.649.291
11	-943.441
12	-4.120.889
13	-6.943.798
14	-9.462.736
15	-11.719.964
16	-13.750.935
17	-15.585.508
18	-17.248.928
19	-18.762.612
20	-20.144.805
21	-21.411.101
22	-22.574.878
23	-23.647.652
24	-24.639.375
25	-25.558.671
TIR (%)	10,73%

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Se obtienen los valores del VAN y la TIR. El valor actual neto es de **2.649.291 €**, correspondiente a una tasa de descuento del 10%. Por otro lado, la tasa interna de retorno es un **10,73%** aproximadamente.

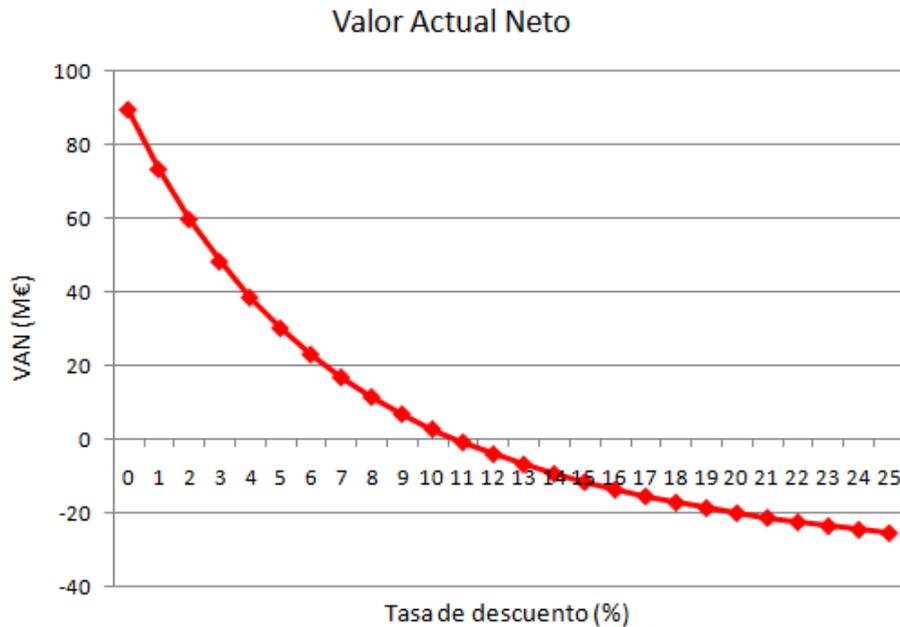


Figura 43. Representación del VAN en función de la tasa de descuento. Fuente: Propia.

Es posible observar la tendencia descendente del VAN a medida que aumenta la tasa de descuento, en la figura 43. En el momento en el que el VAN es nulo, la tasa de descuento es de un 10,73%, que corresponde a la Tasa interna de retorno.

El VAN es positivo ($VAN > 0$) y la TIR es superior a la tasa de descuento aplicada en el flujo de caja ($TIR > 8\%$). Estos datos muestran que llevar a cabo el proyecto en cuestión es rentable.

8. CONCLUSIONES

Al finalizar los estudios llevados a cabo a lo largo de este TFG en el que se ha hecho un análisis de la viabilidad técnica y económica de una central geotérmica, se proceden a desarrollar las conclusiones importantes que se pueden extraer de la información expuesta.

8.1. CONCLUSIONES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

Para empezar, una vez se conocen las características de la energía geotérmica, se puede comentar que no debe ser una alternativa a las fuentes de energía más comunes en la actualidad. Por el contrario, debería convertirse en una de las soluciones sólidas a los problemas que se están dando hoy en día y que tendrán lugar en los próximos años, problemas que se relacionan directa o indirectamente con el cambio climático.

Conforma una fuente de energía que, si se aprovecha adecuadamente, puede tener un gran potencial para poder disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Se elevada versatilidad permite aplicar su función en diferentes ámbitos y situaciones de consumo eléctrico y térmico.

Además, aporta una enorme estabilidad a los sistemas eléctricos basados en energías renovables como la energía solar o eólica, debido a su carácter de producción regulable según las necesidades. Esta característica hace que sea una fuente de energía en la que se pueden basar el resto de instalaciones de energías renovables para adaptar la producción eléctrica en los sistemas eléctricos.

8.2. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO ENERGÉTICO DE LA PALMA.

El análisis del sistema eléctrico de la isla llevado a cabo en este trabajo refleja la situación actual de la demanda de potencia necesaria para cubrir las necesidades de la población. Asimismo, se observa que esta demanda es similar todos los días del año, existiendo pocas variaciones, lo que hace que se puedan dimensionar más fácilmente los sistemas de producción de energía que se vayan a instalar.

Es posible comprobar que actualmente se cubre un 90% de la demanda, aproximadamente, con combustibles fósiles como el diesel, en la central térmica convencional. Este hecho es imperativo alterarlo con la integración de las energías renovables, con el objetivo de alcanzar autosuficiencia energética en La Palma y también para poder reducir lo máximo posible la emisión de gases de efecto invernadero. Para solucionar estos problemas, la energía geotérmica puede llegar a ser fundamental.

La demanda máxima de potencia diaria en la isla es de unos 38 MW, según el estudio realizado, y la potencia de la central geotérmica de tipo flash que se ha dimensionado, es de

unos 30 MW. Si la central opera a máxima potencia, el porcentaje de cobertura de demanda de la central geotérmica sería de un 79% en esos días de máxima demanda.

El porcentaje restante se puede cubrir mediante otras energías renovables en esos momentos de máxima demanda. Los días en los que la demanda de potencia sea menor, la isla se podrá abastecer más fácilmente de energía eléctrica mediante la combinación de los sistemas de generación eléctrica existentes, presumiblemente de carácter renovable.

8.3. CONCLUSIONES DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA.

La instalación de una nueva central geotérmica conlleva la realización de inversiones y gastos de mantenimiento. Sin embargo, también se consigue un periodo de retorno cuando la central se encuentra operativa. Los ingresos que permiten amortizar la central se obtienen de la venta de energía a lo largo de los años y de la retribución a las renovables que se aplica a la energía geotérmica.

La energía eléctrica generada en una planta geotérmica tiene un precio de venta en el mercado más reducido, de 43,29 €/MWh, que el que se tiene en el mercado hoy en día, que es de 214 €/MWh. Por tanto, este hecho hace que el precio de la electricidad en La Palma se pueda reducir 170,71 €/MWh, lo que tiene múltiples beneficios para la economía.

El principal beneficio en el ámbito económico es la ausencia o la disminución de la importación de combustibles fósiles para generar electricidad, que motiva la independencia energética en la isla. Además, otro beneficio de la reducción del precio de venta de energía en la isla es el aumento del poder adquisitivo de los consumidores, lo que ayuda a avanzar en otros ámbitos.

Según la producción eléctrica que se lleva a cabo, los ingresos adquiridos el primer año, gracias a las retribuciones convenientes y a la venta de electricidad son de casi 13 M€, mientras que los años restantes son de 6,62 M€ gracias a la venta de energía solamente. Por otro lado, la inversión de la central es de 52,2 M€ y sus costes de mantenimiento y operación anuales representan unos 1,22 M€.

Todas estas inversiones, gastos e ingresos consiguen que al final de la vida útil de la central, se puedan obtener unos beneficios de 15,6 M€, con un VAN positivo de 2,65 M€ y una TIR superior a la tasa de descuento, de 10,73%.

Los datos económicos adquiridos representan unas cantidades razonables para poder instalar una central geotérmica. Asimismo, se puede decir que el proyecto es rentable y tendría diversos beneficios llevarlo a cabo.

Por otro lado, siempre existe un riesgo de inversión económica en instalaciones de este tipo. Sin embargo, si la información desarrollada es favorable, como se muestra en este análisis, la posibilidad de obtener una utilidad significativa para una isla como La Palma es elevada.

9. BIBLIOGRAFÍA

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2015). *El Acuerdo de París*. <<https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris#:~:text=Fue%20adoptado%20por%20196%20Partes,comparaci%C3%B3n%20con%20los%20niveles%20preindustriales>> [Consulta: 10 de mayo de 2022]

ARANDA, J.L. (2022). *El precio de la gasolina en España bate su récord histórico por sexta semana consecutiva*. <<https://elpais.com/economia/2022-03-10/el-precio-de-la-gasolina-en-espana-bate-su-record-historico-por-sexta-semana-consecutiva.html#:~:text=La%20gasolina%20es%20un%2029,m%C3%A1s%20por%20repostar%2055%20litros>> [Consulta: 10 de mayo de 2022]

La Palma Renovable. *Datos de energía en La Palma*. <<https://lapalmarenovable.es/energia-en-la-palma/>> [Consulta: 11 de mayo de 2022]

Educaweb (2021). *El empleo aumenta en el sector de las energías renovables. ¡Fórmate para ello!* <<https://www.educaweb.com/noticia/2021/10/27/empleo-aumenta-sector-energias-renovables-20723/#:~:text=El%20sector%20de%20las%20energ%C3%ADas%20verdes%20crear%C3%A1%2043%20millones%20de,Energ%C3%ADas%20Renovables%20y%20la%20OIT>> [Consulta: 7 de mayo de 2022]

Boletín Oficial del Estado (2018). *Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018*. <<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2018-82107>> [Consulta: 14 de mayo de 2022]

Asociación de Empresas de Energías Renovables. *Marco Regulatorio de la geotérmica de alta entalpía*. <<https://www.appa.es/appa-geotermica-de-alta-entalpia/marco-regulatorio-geotermica-de-alta-entalpia/>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

Gobierno de Canarias (2009). *Decreto 141/2009, 10 noviembre*. <<https://www.gobiernodecanarias.org/juriscan/ficha.jsp?id=62204>> [Consulta: 12 de mayo de 2022]

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Geoplat (2021). *Top 10 de los países con mayor capacidad instalada de energía geotérmica en 2020*. <<https://www.geoplat.org/2021/04/21/top-10-de-los-paises-con-mayor-capacidad-instalada-de-energia-geotermica-en-2020/>> [Consulta: 16 de mayo de 2022]

Instituto Geológico y Minero de España (2002). *La geotermia en el mundo*. <<https://www.igme.es/geotermia/la%20geotermia%20en%20el%20mundo.htm>> [Consulta: 16 de mayo de 2022]

ORCHE GARCÍA, E. (2011). *Energía Geotérmica*. Madrid: E.T.S.I. Minas, Universidad Politécnica de Madrid.

MOSQUERA, P. (2021). *La geotérmica europea sortea la pandemia y se prepara para iniciar una gran década*. <<https://www.energias-renovables.com/geotermica/la-geotermica-europea-sortea-la-pandemia-y-20210604>> [Consulta: 16 de mayo de 2022]

JORQUERA, C. (2021). *Energía geotérmica – tesoro olvidado de España*. <<https://www.piensageotermia.com/energia-geotermica-tesoro-olvidado-de-espana/>> [Consulta: 16 de mayo de 2022]

Geoplat, IDAE (2022). *España alcanza los 293 MW de potencia geotérmica instalada*. <<https://geotermiaonline.com/12793/espana-alcanza-los-293-mw-de-potencia-geotermica-instalada/#:~:text=Espa%C3%B1a%20alcanza%20los%20293%20MW%20de%20potencia%20geot%C3%A9rmica%20instalada%20%E2%80%A2%20Geotermia>> [Consulta: 16 de mayo de 2022]

IDAE, IGME (2008). *Manual de Geotermia*. <https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10952_manual_geotermia_a2008_e3bf1e59.pdf> [Consulta: 17 de mayo de 2022]

ONU (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>> [Consulta: 17 de mayo de 2022]

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) (2020). *Estrategia de la geotermia en Canarias*. <https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/ocean/images/Documentos/Estudios/D5_Estrategia_Geotermia_Canarias.pdf> [Consulta: 17 de mayo de 2022]

YouTube, “Geotermia: ¿solución energética para La Palma?” en Youtube <<https://youtu.be/wgcgm0LdEzE>> [Consulta: 17 de mayo de 2022]

Geoplat (2010). *Visión a 2030*. <<https://www.geoplat.org/portfolio-items/vision-2030/>> [Consulta: 18 de mayo de 2022]

JORQUERA, C. (2020). *Fluidos geotérmicos y eficiencia de las operaciones geotérmicas: nuevo proyecto de investigación*. <<https://www.piensageotermia.com/fluidos-geotermicos-y-eficiencia-de-las-operaciones-geotermicas-nuevo-proyecto-de-investigacion/>> [Consulta: 20 de mayo 2022]

DIPIPO, R. (2012). *Geothermal Power Plants*. North Dartmouth, Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

IDAE (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica*. <https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf> [Consulta: 22 de mayo de 2022]

Boletín Oficial del Estado (BOE) (2021). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*. <<https://www.boe.es/boe/dias/2021/03/31/pdfs/BOE-A-2021-5106.pdf>> [Consulta: 24 de mayo de 2022]

El Time (2020). *Un estudio científico en 3D revela la presencia de un sistema geotérmico activo en Cumbre Vieja*. <<https://www.elttime.es/isla-bonita/136-medio-ambiente/29943-un-estudio-cientifico-en-3d-revela-la-presencia-de-un-sistema-geotermico-activo-en-cumbre-vieja.html>> [Consulta: 12 de junio de 2022]

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma

ORMAD, A. (2012). *Novedades en el proyecto de San Jacinto Tizate*. <<https://www.piensageotermia.com/novedades-en-el-proyecto-de-san-jacinto-tizate/>> [Consulta: 14 de junio de 2022]

Red eléctrica de España (REE) (2022). *Sistema eléctrico canario. Demanda canaria en tiempo real*. <<https://www.ree.es/es/actividades/sistema-electrico-canario/demanda-de-energia-en-tiempo-real>> [Consulta: 17 de junio de 2022]

Wikipedia (2022). *Central térmica Los Guinchos*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Central_t%C3%A9rmica_Los_Guinchos> [Consulta: 20 de junio de 2022]

MOYA, D., PAREDES, J., KAPARAJU, P. (2018). *Technical, financial, economic and environmental pre-feasibility study of geothermal power plants by RETScreen –Ecuador’s case study*. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118302478>> [Consulta: 11 de julio de 2022]

Instituto Canario de Estadística (ISTAC) (2022). *Energía eléctrica. Disponible*. <https://www3.gobiernodecanarias.org/istac/statistical-visualizer/visualizer/data.html?resourceType=indicator&resourceId=ENERGIA_ELECTRICA_DISPONIBLE&measure=ABSOLUTE&geo=ES70#visualization/column> [Consulta: 14 de julio de 2022]

Observatorio de la Energía de Canarias (OECAN) (2022). *Precio medio de la generación eléctrica*. <<https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/precios>> [Consulta: 14 de julio de 2022]

Boletín Oficial del Estado (BOE) (2020). *Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables*. <<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-6123>> [Consulta: 14 de julio de 2022]

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

En el estudio de viabilidad realizado se incluye una valoración económica de la planta geotérmica. Sin embargo, como no se trata de un diseño de ingeniería con un presupuesto de construcción, se opta por añadir como presupuesto del proyecto el coste de la elaboración del estudio.

EXPLICACIÓN DEL PRESUPUESTO.

En el análisis de viabilidad de instalación de la central geotérmica no se han necesitado desembolsos significativos al no requerirse materiales o equipos que influyen en la realización del trabajo.

Principalmente, se han utilizado programas informáticos que no incluyen un coste de licencia al ser de uso educativo, como el Microsoft Word, en el que se ha redactado toda la información que contiene el TFG, y el Microsoft Excel, en el cual se han efectuado algunos cálculos y gráficas que describen las situaciones estudiadas.

Por otro lado, se ha empleado una cantidad importante de tiempo para llevar a cabo el estudio. Las horas requeridas para la realización del trabajo han sido la recopilación de información, síntesis de documentación y redacción informática han sido 300 horas. El tiempo invertido se visualiza en el presupuesto. El valor de cada hora que se ha invertido es de 25 €/hora.

Aparte de esto, se añaden unos gastos, que representan un 3% del coste de realización del estudio. Estos gastos representan materiales de escritura, impresión, documentación e información.

CONTENIDOS DEL PRESUPUESTO.

En la siguiente tabla se distribuyen los diferentes componentes del presupuesto de la realización de este Trabajo de Final de Grado.

Tabla 12. Componentes del presupuesto.

Concepto	Horas (h)	Precio (€)
Realización del trabajo	300	7.500
Gastos (3%)	-	225
Base imponible	-	7.725
IVA (21%)	-	1.622,25
Importe TOTAL	-	9.347,25

Análisis de la viabilidad de instalación de una Central Geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma