



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE UNA
CENTRAL GEOTÉRMICA BASADA EN EL CICLO
RANKINE ORGÁNICO UBICADA EN EL
YACIMIENTO GEOTÉRMICO JESÚS MARÍA -
MOQUEGUA”**

Presentado por:

BACH. JESÚS ALONSO BULNES JIMÉNEZ

Asesor:

Msc. Ing. SEGUNDO ABELARDO HORNA TORRES

LAMBAYEQUE – PERÚ

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**“DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE UNA
CENTRAL GEOTÉRMICA BASADA EN EL CICLO
RANKINE ORGÁNICO UBICADA EN EL YACIMIENTO
GEOTÉRMICO JESÚS MARÍA - MOQUEGUA”**

Presentado por:

Bach. JESÚS ALONSO BULNES JIMÉNEZ

Aprobado por el Jurado Examinador:

PRESIDENTE : Msc. ING. TUMIALÁN HINOSTROZA JUAN ANTONIO

SECRETARIO : Dr. ING. CARRANZA MONTENEGRO DANIEL

MIEMBRO : Dr. ING. NOMBRA TEMOCHE JORGE LUIS

ASESOR : Msc. ING. HORNA TORRES SEGUNDO ABELARDO

LAMBAYEQUE – PERÚ

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS DE INGENIERÍA

TITULO

**“DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA
BASADA EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO UBICADA EN EL YACIMIENTO
GEOTÉRMICO JESÚS MARÍA - MOQUEGUA”**

CONTENIDOS:

CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

AUTOR: BACH. JESÚS ALONSO BULNES JIMÉNEZ

**Msc. Ing. Tumialán Hinojosa Juan Antonio
PRESIDENTE**

**Dr. Ing. Carranza Montenegro Daniel
SECRETARIO**

**Dr. Ing. Nombera Temoche Jorge Luis
MIEMBRO**

**Msc. Ing. Horna Torres Segundo Abelardo
ASESOR**

LAMBAYEQUE – PERÚ

2018

DEDICATORIA

A mi familia, por haber sido fuente inagotable de apoyo, por sus palabras de aliento que no me dejaban caer para que siguiera adelante y por estar siempre presente para lo que necesite a lo largo de la etapa universitaria.

A mis maestros, mis compañeros y la universidad por los copiosos conocimientos y oportunidades que me han brindado sin esperar nada a cambio.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme dado salud y sabiduría para lograr mis objetivos y a mis abuelos que siempre creyeron en mí.

A mi familia por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, por su apoyo y comprensión en las horas que me ausenté de ellos para trabajar esta temática y sobre todo por la motivación constante para alcanzar mis metas.

Por último, agradezco a mi querida facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por la formación académica y a mi asesor Msc. Ing. Segundo Horna que me apoyó con las inquietudes que se formaron en el desarrollo de la presente tesis.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo Dimensionar y Seleccionar una central geotérmica binaria basada en el ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico) aprovechando los pozos geotérmicos de media entalpía, del yacimiento geotérmico Jesús María en Moquegua.

Con la finalidad de reducir la contaminación ambiental, satisfacer la demanda creciente de energía eléctrica y basados en el estudio denominado “Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua” (INGEMMET, 2014) es que proponemos generar energía eléctrica mediante el uso de un Ciclo Binario (también llamado Ciclo Rankine Orgánico) en el yacimiento geotérmico llamado “Jesús María” –Moquegua.

El tipo de investigación fue aplicada y descriptiva porque se hará uso de los conocimientos y bases teóricas de la ingeniería para el dimensionamiento de la central geotérmica. Como resultado del estudio se diseñó una central geotérmica de ciclo binario con una potencia instalada de 4,5MW.

Los equipos que componen el Ciclo Rankine Orgánico de la central geotérmica son: turbina de vapor, generador síncrono, condensador de superficie, Pre calentador y evaporador (intercambiadores de calor), bomba de condensado y re inyección, Torre de enfriamiento, Tuberías, sistema de alimentación de Isobutano. Se ha

considerado trabajar con el fluido Isobutano. Se dimensionó y seleccionó el caudal en kg/s del fluido de trabajo el cual es de 101,1 kg/s.

La inversión para la planta geotérmica es de S/. 56 000 000 y los ingresos anuales por venta de energía son de s/. 17 416 020. Se obtuvo un VAN de S/. 60 694 413 y un TIR de 12 % por lo que nos demuestra que es un proyecto factible, atractivo para la inversión y rentable.

Palabras clave: energía geotérmica, ciclo Rankine Orgánico, yacimiento geotérmico

ABSTRACT

The objective of this thesis is to Dimension and Select a binary geothermal power plant based on the ORC cycle (Organic Rankine Cycle) taking advantage of the geothermal wells of medium enthalpy, from the Jesús María geothermal deposit in Moquegua.

In order to reduce environmental pollution, satisfy the growing demand for electricity and based on the study called "Characterization and Evaluation of the Geothermal Potential of the Moquegua Region" (INGEMMET, 2014) is that we propose to generate electric power through the use of a Binary Cycle (also called Rankine Organic Cycle) in the geothermal field called "Jesús María" -Moquegua.

The type of research was applied and descriptive because it will make use of the knowledge and theoretical bases of engineering for the sizing of the geothermal power plant. As a result of the study, a binary-cycle geothermal power plant with an installed power of 4,5 MW was designed.

The equipment that make up the Organic Rankine Cycle of the geothermal power plant are: steam turbine, synchronous generator, surface condenser, pre heater and evaporator (heat exchangers), condensate pump and re injection, cooling tower, pipelines, system Isobutane feeding. It has been considered to work with the Isobutane fluid. The flow rate in kg / s of the working fluid, which is 101,1 kg / s, was dimensioned and selected.

The investment for the geothermal plant is S /. 56 000 000 and the annual income from the sale of energy is S /. 17 416 020. A NPV of S /. 60 694 413 and an IRR of 12%, which shows us that it is a feasible project, attractive for investment and profitable.

Keywords: geothermal energy, Organic Rankine cycle, geothermal field

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN.....	iii
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Realidad Problemática	3
1.2. Formulación del Problema	5
1.3. Delimitación de la Investigación	5
1.3.1. Delimitación espacial	5
1.3.2. Delimitación temporal.....	11
1.4. Justificación e Importancia de la investigación.....	11
1.4.1. Justificación	11
1.4.2. Importancia	12
1.5. Limitaciones de la TESIS	12
1.6. Objetivos de la TESIS	12
1.6.1. Objetivo General	12
1.6.2. Objetivo Específicos.....	13

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes de Estudios.....	14
2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado	20
2.2.1. Energías renovables	20
2.2.2. Geotermia	22
2.2.3. Antecedentes históricos de la geotermia	23
2.2.4. Energía geotérmica.....	25
2.2.5 Aplicaciones de la energía geotérmica	26
2.2.6 Energía geotérmica en el mundo	30
2.2.7. Energía geotérmica en América Latina	47
2.2.8. Energía geotérmica en Perú	49
2.2.9. Energía geotérmica en Moquegua	52
2.2.10. Flujo de calor de la tierra y gradiente geotérmico	56
2.2.11. Manifestaciones geotérmicas.....	59
2.2.12. Yacimiento geotérmico.....	60
2.2.13. Estructura de un yacimiento geotérmico	63
2.2.14. Clasificación de los yacimientos geotérmicos	64
2.2.15. Tipos de plantas geotérmicas	67
2.3 Definición conceptual de la terminología empleada.	82
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	84
3.1. Tipo y diseño de investigación	84
3.2. Población y muestra	84

3.3. Hipótesis.....	84
3.4. Variables - Operacionalización	84
3.5. Métodos y Técnicas de investigación	86
3.6. Descripción de los instrumentos utilizados	87
3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos.....	87
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	89
4.1. Propuesta de la investigación.....	89
CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	91
5.1. Diseño de la planta.....	91
5.1.2. Cálculos	94
5.2. Resultados	101
5.3. Selección de componentes	113
5.4. Discusión de los resultados.....	119
5.5. Análisis económico.....	124
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	131
6.1. Conclusiones.....	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXOS.....	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Coordenadas del yacimiento geotérmico " Jesús María".....	6
Tabla N° 2: Potencial geotérmico en América central, el caribe y América del Sur	48
Tabla N° 3: Potencial geotérmico para las zonas geotermales de la Región Moquegua.....	54
Tabla N° 4: Clasificación de los recursos geotérmicos en base a la temperatura	67
Tabla N° 5: Equipo principal de plantas geotérmicas	81
Tabla N° 6: Variables - Operacionalización	85
Tabla N° 7: Técnicas e instrumentos de investigación	87
Tabla N° 8: Componentes de una planta de ciclo binario	92
Tabla N° 9: Propiedades Termodinámicas de algunos fluidos de trabajo	100
Tabla N° 10: Parámetros iniciales de diseño	101
Tabla N° 11: Resultados de los parámetros de la planta geotérmica binaria con isobutano	110
Tabla N° 12: Parámetros de tuberías	113
Tabla N° 13: Parámetros iniciales de diseño para R114	119
Tabla N° 14: Resultados de los parámetros de la planta geotérmica binaria con R114.....	119
Tabla N° 15: Características de la central geotérmica binaria con R114.....	120
Tabla N° 16: Parámetros iniciales de diseño para Pentano	121
Tabla N° 17: Resultados de los parámetros de la planta geotérmica binaria con Pentano	122
Tabla N° 18: Características de la central geotérmica binaria con Pentano	122

Tabla N° 19: Ítems de la etapa de perforación	125
Tabla N° 20: Ítems del rasgo de planificación.....	126
Tabla N° 21: Ítems del rasgo de perforación	126
Tabla N° 22: Ítems del rasgo de construcción	126
Tabla N° 23: Ítems de costos.....	127
Tabla N° 24: Ingresos por venta de energía anuales	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Potencial geotérmico estimado en el Perú	4
Figura N° 2: Mapa de ubicación de la zona geotermal de Tolapalca-Ichuña-Jesús María.	7
Figura N° 3: Vista panorámica del sector Jesús María.....	7
Figura N° 4: Imagen satelital donde se muestran las principales fallas y lineamientos estructurales en Jesús María-Ichuña.....	8
Figura N° 5: Ubicación de las principales manifestaciones geotermales en Jesús María-Ichuña-Tolapalca.....	9
Figura N° 6: Depósitos de travertinos en Jesús María.	10
Figura N° 7: Energía geotérmica	26
Figura N° 8: Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura	28
Figura N° 9: International Goothermal power Nameplanet capacity (MW)	31
Figura N° 10: Goothermal Power Operating Capacity by Country	33
Figura N° 11: Capacity under Developmente by Country or territory (Mw)	34
Figura N° 12: Sonoma Calpine 3, una de las plantas del complejo geotérmico The Geysers.	36
Figura N° 13: .Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México	37
Figura N° 14: Complejo Geotérmico Larderello. 769 MW. Italia	38
Figura N° 15: Complejo geotérmico Olkaria. 540 MW. Kenia	39
Figura N° 16: Complejo Geotérmico Makban. 458 MW. Filipinas.....	41
Figura N° 17: Complejo Geotérmico Salton Sea. 340 MW. Estados Unidos	42
Figura N° 18: Complejo Geotérmico Hellisheidi. 303 MW. Islandia	43
Figura N° 19: Complejo Geotérmico Tiwi. 289 MW. Filipinas	44

Figura N° 20:Complejo Geotérmico Darajat. 259 MW. Indonesia.....	45
Figura N° 21: Complejo Geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas	46
Figura N° 22: Mapa geotérmico del Perú	51
Figura N° 23: Mapa geotérmico de la Región Moquegua	55
Figura N° 24: Temperaturas de la tierra	56
Figura N° 25: gradiente geotérmico.....	57
Figura N° 26: Fumarolas, laguna de aguas termales, volcán de fango	59
Figura N° 27: Reservorio Geotérmico.....	61
Figura N° 28: zonas Geotermiales	62
Figura N° 29: Esquema de un reservorio geotérmico.....	64
Figura N° 30: Diagrama simplificado de una planta geotérmica de tipo vapor directo.....	69
Figura N° 31: Diagrama de planta geotérmica single flash.....	72
Figura N° 32: Diagrama de planta geotérmica Double flash.....	74
Figura N° 33: Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario.....	76
Figura N° 34: Esquema del ciclo orgánico Rankine.....	78
Figura N° 35: Planta geotérmica binaria propuesta	90
Figura N° 36: Modelo conceptual de la circulación de fluidos de la zona geotermal “Jesús María”	93
Figura N° 37: Esquema de la central de ciclo binario	94
Figura N° 38: Evaporador y precalentador	95
Figura N° 39: Diagrama Temperatura vs Calor transferido para precalentador y evaporador	96
Figura N° 40: Esquema simplificado de una turbina.....	98
Figura N° 41: Esquema simplificado de una bomba.....	98

Figura N° 42: Esquema simplificado de un condensador de superficie	99
Figura N° 43: Curva de producción	102
Figura N° 44: Diagrama temperatura vs calor transferido	109
Figura N° 45: Diafragma T-s Isobutano	111
Figura N° 46: Intercambiador de calor	114
Figura N° 47: Turbina de vapor de una etapa	115
Figura N° 48: Generador síncrono.....	116
Figura N° 49: Condensador de superficie.....	117
Figura N° 50: Torre de enfriamiento	118
Figura N° 51: Diafragma T-s R114	121
Figura N° 52: Diafragma T-s Pentano	123
Figura N° 53: Potencia Máxima con diferentes fluidos de trabajo	124
Figura N° 54: Perfil de riesgo en las diversas etapas de desarrollo del proyecto	124

INTRODUCCIÓN

En la presente Tesis se dimensionó una central geotérmica ubicada en el yacimiento geotérmico “Jesús María” (Moquegua) utilizando nueva tecnología y el Ciclo Rankine Orgánico para el aprovechamiento de pozos geotérmicos de media entalpía. La localidad escogida es la ciudad de Moquegua ya que cuenta con un estudio de potencial geotérmico realizado por el INGEMMET y está autorizado para la explotación de sus recursos. La presente Tesis se ha dividido en seis Capítulos y Anexos, los mismos que a continuación se describen.

En el **Capítulo I** titulado “Realidad problemática” se describe la importancia de un sistema de generación de energía eléctrica, se establecieron los objetivos generales y específicos, en base al cual se formula la hipótesis de la Tesis.

En el **Capítulo II** titulado “Marco teórico” se describe el marco teórico y conceptual de los temas involucrados en la investigación, tales como la energía geotérmica, el despacho económico y la sostenibilidad ambiental.

En el **Capítulo III** titulado “Marco metodológico” se explica las técnicas e instrumentos para la recolocación y tratamiento de los datos con la finalidad de alcanzar el objetivo general y específicos.

En el **Capítulo IV** titulado “Propuesta de la investigación” aquí en base al tipo de yacimiento geotérmico se propone el tipo de planta geotérmica apropiado para obtener energía eléctrica.

En el **Capítulo V** titulado “Análisis e interpretación de los resultados” se realizan los cálculos de los equipos para la planta geotérmica, así como también el presupuesto y su respectiva evaluación económica.

En el **Capítulo VI** Se dan a conocer las conclusiones, recomendaciones, problemas abiertos y propuestas de mejora.

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad Problemática

Actualmente a nivel mundial y nacional se está tratando de buscar nuevas alternativas para la generación de electricidad con energías limpias debido a que se tiene una gran dependencia energética del petróleo y otros combustibles fósiles derivados. Como ya es sabido nuestra sociedad tiene un continuo incremento en el consumo energético lo cual produce una reducción de los recursos fósiles y genera contaminación por la emisión de gases de combustión que se descargan en la atmósfera dañando sistemas ecológicos, provocando afectaciones en la salud humana y hasta la extinción de especies tanto animales como vegetales.

En nuestra región se consumen diversos combustibles para la generación de electricidad como el carbón, gas y petróleo. Tenemos también centrales que utilizan energías renovables como hidroeléctricas, centrales eólicas y solares que ya están en funcionamiento y aportan cantidades importantes de energía al sistema eléctrico interconectado nacional. Debido a que en nuestra región existen otras formas de energías renovables como la geotermia, se está dando un mayor impulso al empleo de estos recursos que son abundantes, requiriendo elaborar estudios de su comportamiento a fin de determinar su mejor aprovechamiento.

Actualmente, la energía geotérmica en el Perú, está en estudios de potencial y aún no se desarrolla por falta de tecnologías y una política de inversión de energías limpias, definidas y alineadas a un futuro que garantice la disminución de la contaminación y desarrollo en el país.

Tenemos entidades como JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) e INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico) que ya han realizado estudios para determinar el potencial geotérmico aprovechable en el país.

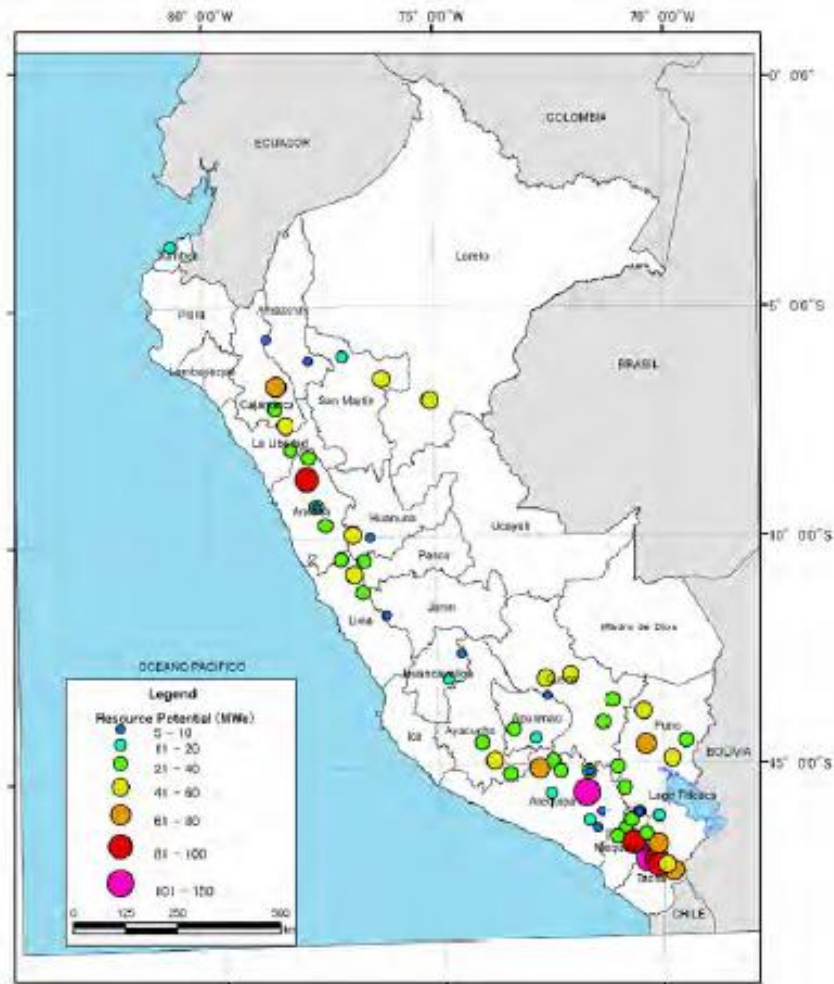


Figura N° 1: Potencial geotérmico estimado en el Perú

Fuente: (JICA, 2012, pág. 5)

En el estudio denominado “Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú” (JICA, 2012) se encuentra un potencial aprovechable en nuestra región de 2 680 MWe repartidos en diferentes yacimientos geotérmicos (ver Figura N° 1).

Con la finalidad de reducir la contaminación ambiental, satisfacer la demanda creciente de energía eléctrica y basados en el estudio denominado “Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua” (INGEMMET, 2014) es que proponemos generar energía eléctrica mediante el uso de un Ciclo Binario (también llamado Ciclo Rankine Orgánico) en el yacimiento geotérmico llamado “Jesús María” –Moquegua.

1.2. Formulación del Problema

¿Cómo podemos aprovechar la energía geotérmica en el yacimiento de Jesús María en Moquegua para producir energía eléctrica?

1.3. Delimitación de la Investigación

1.3.1. Delimitación espacial¹

La zona geotermal donde se va a realizar el estudio en el sector Jesús María el cual se localiza en el Altiplano de la cordillera de los Andes, en la región Moquegua, al sur del Perú, donde ocurre volcanismo Neógeno a Cuaternario (Figura N° 3).

Jesús María, está ubicado al oeste del pueblo de Ichuña, se llega a través de una carretera afirmada (40 minutos); aquí las manifestaciones se ubican en un valle angosto de fuertes pendientes, a una altitud promedio de 4100 m s. n. m., formado por el curso del río San Antonio y circundado por cerros de rocas volcánicas. (INGEMMET, 2014)

¹ (INGEMMET, 2014, pág. 38)

Ichuña también está ubicado al oeste del pueblo del mismo nombre (20 minutos). Las manifestaciones se ubican en la margen izquierda del río Ichuña a una altitud promedio de 3930 m s. n. m. (INGEMMET, 2014)

Las coordenadas geográficas del yacimiento geotérmico “Jesús María”

Coordenadas UTM:

Tabla N° 1: Coordenadas del yacimiento geotérmico " Jesús María"

Coordenadas		Sistema
Norte	Este	WGS84
8 216 936	348 775	

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 39)

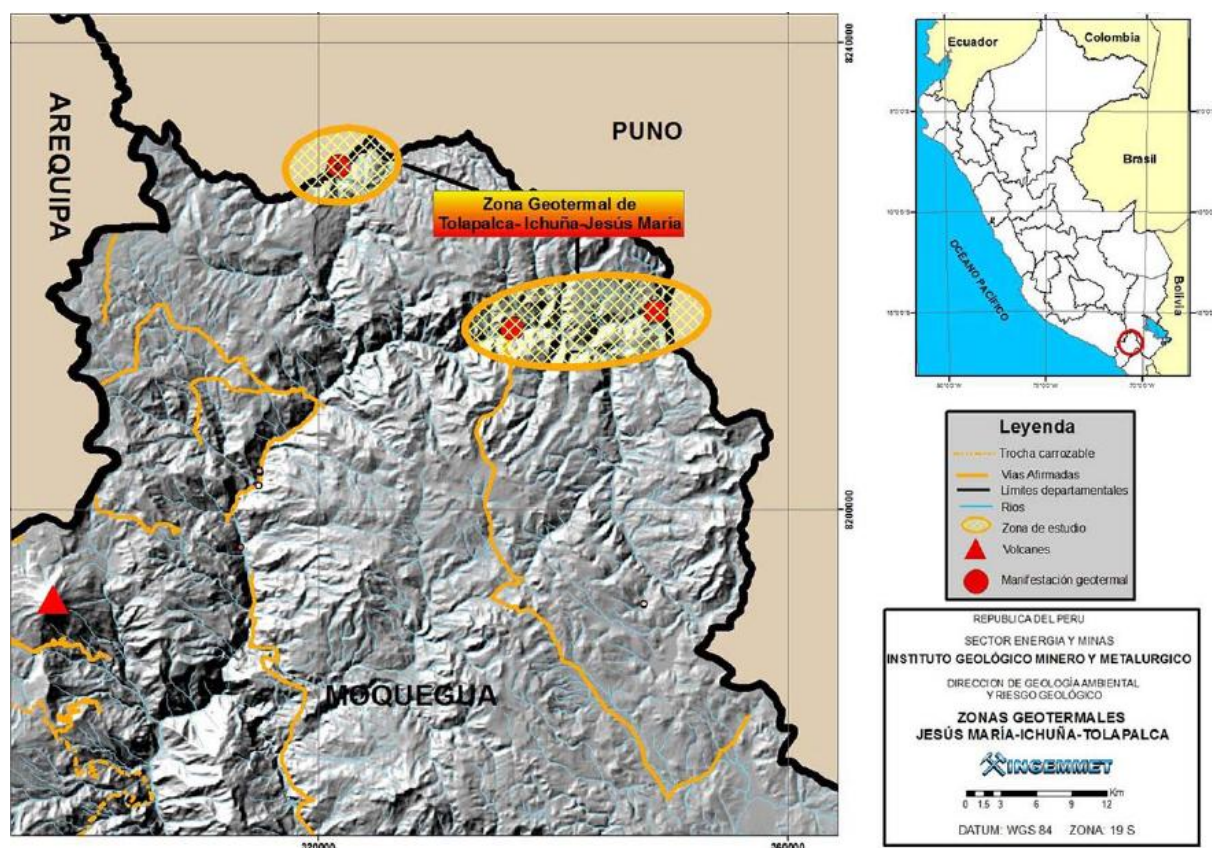


Figura N° 2: Mapa de ubicación de la zona geotermal de Tolapalca-Ichuña-Jesús María.

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 39)



Figura N° 3: Vista panorámica del sector Jesús María

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 40)

Rasgos geológicos²: En esta zona predominan rocas volcánicas y sedimentarias, y en menor distribución rocas intrusivas. Las primeras están conformadas por afloramientos de la formación Pichu (Eoceno), constituida por andesitas basálticas. En el sector de Jesús María se observan afloramientos de la formación Sencca, constituida por tobas riolíticas. También se tiene al grupo Maure, en su facie sedimentaria, donde sus afloramientos cubren la mayor parte de esta zona, esta facie está constituida por limoarcillitas, areniscas y conglomerados (Rodríguez et al., 2000; Galdós & Ticona, 2000). Las rocas sedimentarias afloran principalmente en la parte

² (INGEMMET, 2014, pág. 38)

este y sureste de esta zona, sus afloramientos constituyen una secuencia jurásico-cretácea del grupo Yura, donde se tiene en la base intercalaciones de lutitas negras, grises y areniscas de la formación Cachios, luego se observan areniscas intercaladas con lutitas y niveles calcáreos de la formación Labra, sobre estos afloramientos se tiene una secuencia de calizas grises fosilíferas de la formación Gramadal. Finalmente, se tienen areniscas cuarzosas de la formación Hualhuani y lutitas, areniscas rojas de la formación Murco (Lipa et al., 2000).

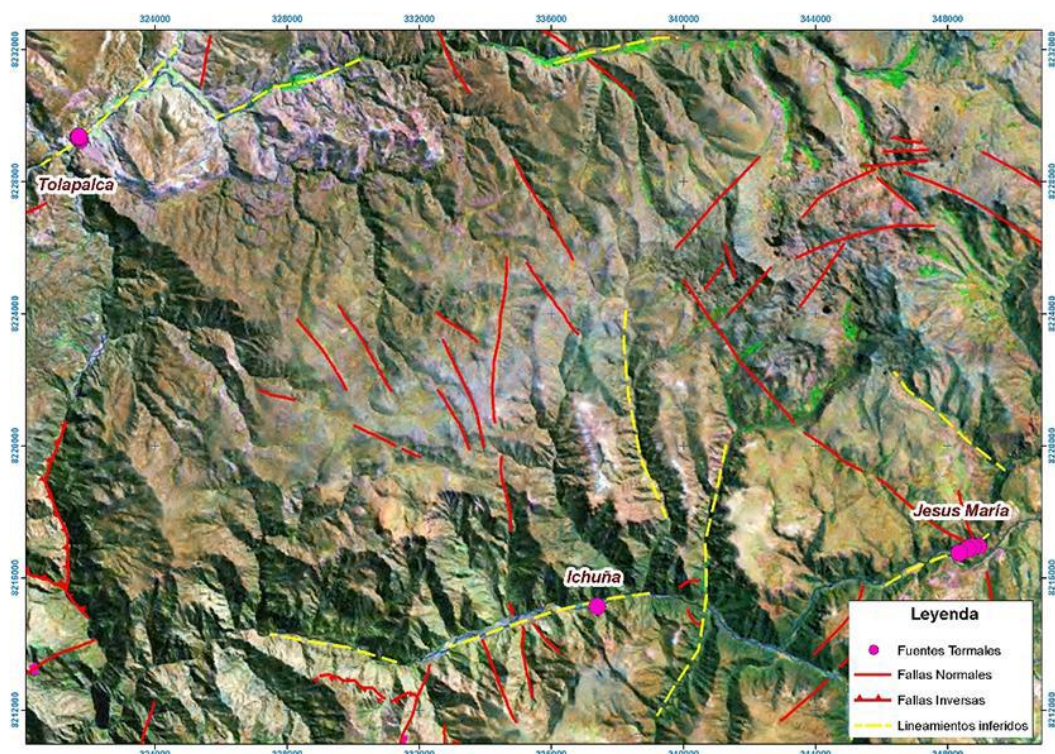


Figura N° 4: Imagen satelital donde se muestran las principales fallas y lineamientos estructurales en Jesús María-Ichuña

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 43)

Manifestaciones geotermiales: En esta zona se han identificado numerosas manifestaciones geotermiales (ver Figura N° 5), la mayoría de ellas son fuentes termales. (INGEMMET, 2014)

En Jesús María se tienen numerosas fuentes termales distribuidas a lo largo y en ambas márgenes del río San Antonio, con temperaturas que llegan a superar los 50 °C, el pH es neutro y los valores de conductividad eléctrica son elevados con valores superiores a los 30 mS/cm, un indicativo de la elevada mineralización de esta agua. Asimismo, las fuentes tienen un importante caudal de descarga, superior a los 5 L/s, algunas de las cuales presentan abundante burbujeo, debido a la presencia de gases disueltos como el CO₂. En las inmediaciones de las fuentes se observa presencia de precipitados de óxidos de hierro de color rojizo y sales de color blanquecino, así como la presencia de algas verdosas en la surgencia y alrededores de las fuentes.

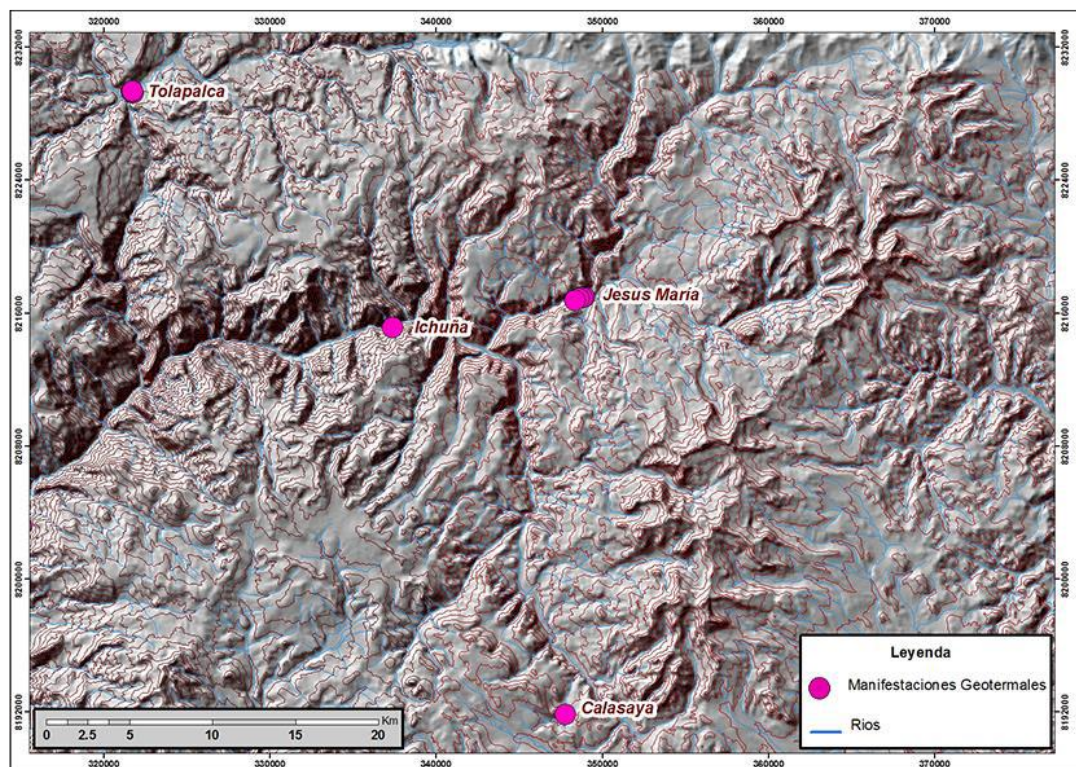


Figura N° 5: Ubicación de las principales manifestaciones geotermiales en Jesús María-Ichuña-Tolapalca.

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 44)

La actividad geotermal en este sector es grande y ha originado la formación de importantes depósitos de travertinos, los cuales llegan a más de 3 metros de espesor, dichos depósitos se observan principalmente en la margen derecha del río San Antonio (Ver Figura N° 6) y se disponen a manera de terrazas. (INGEMMET, 2014)



Figura N° 6: Depósitos de travertinos en Jesús María.

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 45)

Características hidroquímicas: La zona geotermal de Jesús María se caracteriza por presentar una gran cantidad de manifestaciones de fuentes termales que emergen en las orillas del río San Antonio, así como en el curso del mismo, a una altura de 4000 m s. n. m., con temperaturas que varían entre los 40 °C a 50 °C, con pH de 6 a 7, y conductividad eléctrica desde 30 a 37 mS/cm. Asimismo, estas fuentes se caracterizan por presentar en su composición química una elevada concentración del ion cloruro, desde 10 667 a 13 454 mg/L, y sodio entre 7123 a 9040 mg/L , típico de aguas que provienen de reservorios geotermales. El balance iónico calculado para los resultados analíticos de estas aguas es de 2 %, siendo un valor aceptable. (INGEMMET, 2014, pág. 42)

1.3.2. Delimitación temporal

El trabajo de tesis tuvo una duración de 06 meses.

1.4. Justificación e Importancia de la investigación

1.4.1. Justificación

Justificación Económica

Bajo la iniciativa de resolver la dependencia de los combustibles fósiles debido a que estos en los últimos años se han vuelto cada vez más escasos incrementando su precio por lo que bajo proyecciones puede llegar a concluir en un déficit energético. Es por lo anteriormente mencionado que se busca utilizar tecnologías no convencionales para la generación de energía incrementando así la matriz energética.

Justificación Social

El aumento del consumo de energía en nuestro país en zonas alejadas justifica realizar estudios e inversiones para la generación de energía de origen no convencional.

Justificación Ambiental

Con el dimensionamiento y puesta en marcha de esta planta de tecnología geotérmica se logrará minimizar la contaminación en la producción de energía. Una planta de este tipo produce 1/6 de las emisiones de CO₂ de una central térmica a gas natural por kWh producido³.

³ (Cordova Zapata, 2007)

Justificación científica

Promover el uso de las energías no convencionales

1.4.2. Importancia

De acuerdo a los antecedentes investigados, la energía geotérmica no utilizada aún en nuestro país, ofrece importantes ventajas frente a energías convencionales. La presente tesis sirve como referencia para otros profesionales o investigadores que buscan el uso energías limpias mediante plantas geotérmicas para la generación de electricidad.

1.5. Limitaciones de la TESIS

La principal limitación de la investigación fue la falta del estudio del pozo geotérmico realizando perforación de pozos exploratorios para determinar caudal a diferentes presiones y tener una gráfica exacta de la “Curva de Producción” del pozo geotérmico. Debido a que esta data no se obtuvo, nos basamos en curvas de producción de pozos geotérmicos de media entalpía similares.

1.6. Objetivos de la TESIS

1.6.1. Objetivo General

Dimensionar y Seleccionar una central geotérmica binaria basada en el ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico) aprovechando los pozos geotérmicos de media entalpía, del yacimiento geotérmico Jesús María en Moquegua.

1.6.2. Objetivo Específicos

- a) Dimensionar y seleccionar los componentes del CICLO RANKINE ORGÁNICO
- b) Comparar las diferentes alternativas de fluidos de trabajo a utilizar.
- c) Dimensionar y seleccionar el caudal en Kg/s, del fluido de trabajo.
- d) Establecer la Rentabilidad de la central geotérmica binaria.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Estudios

Las investigaciones realizadas referentes al tema son las siguientes:

Contexto Internacional

BAGIEREK (2010) en su tesis titulado: “Design of A Geothermal Binary Sistem For Operation In Remote Areas” (“Diseño de un Sistema Geotermal Binario para Operar en áreas remotas”), tiene como finalidad el diseño de una central geotérmica de ciclo binario sin conexión a la red y de baja demanda para un área remota con una cierta cantidad de habitantes. Dentro de los resultados encontramos que la utilización de ORC (Organic Rankine Cycle) y la elección correcta del fluido de trabajo a utilizar es fundamental para el correcto desempeño de la central. Finalmente se concluye que las plantas geotérmicas de ciclo binario son sensibles a diferentes factores y que cada diseño de planta depende del ambiente donde está localizado y que usa componentes a medida de acuerdo al fluido de trabajo seleccionado. Además, compara una central geotérmica con una central a diésel y llega a la conclusión que su costo de operación de una central geotérmica es mucho más barato y que el costo puede ser recuperado en 5 años, pero una desventaja es su gran costo de inversión.

KOPUNIČOVÁ (2009) “Feasibility study of Binary Geothermal Power Plants In Eastern Slovakia” (ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE CENTRALES GEOTERMALES DE CICLO BINARIO EN EL ESTE DE ESLOVAQUIA), esta tesis tiene como finalidad modelar una central geotérmica binaria con ciclo ORC y otra

con ciclo Kalina y comparar los diferentes sistemas en términos de eficiencia, potencia de salida y factibilidad financiera. Dentro de los resultados obtenidos encontramos que, para la utilización de fuentes de baja temperatura, la generación de energía más aplicable se basa en pequeñas centrales geotérmicas binarias con ciclo ORC o ciclo Kalina. Finalmente se concluye que las centrales que operan con ciclo Kalina son mejores en ciertas áreas a ciertas condiciones, pero a la hora de decidir que ciclo es el mejor para la central es complicado de elegir. Otra conclusión fue que para el problema analizado a cierta temperatura de entrada se obtiene 1 MW más con el ciclo Kalina que con el ciclo ORC.

BARRIGA (2007), en su tesis título: “GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA EN CHILE: ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES PARA SU DESARROLLO SUSTENTABLE esta tesis tiene como finalidad analizar el escenario chileno requerido para el desarrollo de energía geotérmica generando un diagnóstico que permita conocer los impedimentos e incentivos para su avance. Dentro de los resultados obtenidos se encontró que el escenario chileno no cuenta recursos humanos ni técnicos, como profesionales en la materia y con experiencia que puedan realizar los estudios. Finalmente se concluye que existe un gran costo de inversión de plantas geotérmicas, pero con un bajo costo de mantenimiento y operación lo cual compensaría y que el gobierno chileno aumentará un 15 % de capacidad instalada de energías renovables no convencionales y la geotermia aportaría 1/5 de ese objetivo.

MATAMALA (2014) en su tesis titulado: “ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE CICLOS TERMODINÁMICOS PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA A PARTIR DE RECURSOS GEOTERMALES DE MEDIA Y ALTA ENTALPÍA” Nos indica que

el aumento progresivo en los costos de producción de electricidad en nuestro país, sumado al déficit que se prevé que este insumo presentará considerando el crecimiento gradual de su demanda frente a la cobertura actual de su oferta, se debe, entre otras variables, a la exigua diversificación de nuestra matriz energética frente a las alternativas de generación tradicionales; termoelectricidad e hidroelectricidad. Ante este escenario, es menester el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de electricidad, a partir de fuentes nacionales, con costos competitivos, de fácil acceso, y con poco impacto en el medio ambiente.

Mediante el presente Trabajo de Título, se busca dar solución a esta necesidad, brindando sustento teórico a la termodinámica implicada en la transformación energética comprendida en el uso de recursos geotermales. A partir de la programación de cuatro configuraciones de ciclo orientadas a la generación eléctrica con sistemas geotermales hidrotermales; ciclo de utilización directa, ciclo de una etapa de expansión súbita, ciclo de doble expansión súbita y ciclo binario, y utilizando diferentes temperaturas del geofluido para distintas condiciones de presión de entrada, se obtuvieron resultados que permitieron realizar un análisis completo a cada uno de los ciclos modelados, para luego comparar, mediante la fabricación de diagramas, los desempeños según potencia máxima generada y eficiencia térmica lograda, con el fin de recomendar alguna configuración para un recurso geotermal en particular. Se empleó en estas modelaciones agua pura como fluido geotérmico, una curva de producción del pozo obtenida de la bibliografía y una temperatura de condensación de 40 °C. Se encontró que la temperatura del yacimiento, con el nivel de potencia generado y la eficiencia térmica se relacionaban de forma directa. De manera similar, la presión de entrada determina el flujo másico de geofluido participante, y aumenta levemente el trabajo específico

desarrollado en la turbina. Entre las configuraciones que presentaron mejor desempeño, se observó notoria jerarquía de las centrales de vapor seco frente a sus contendientes de alta entalpía; los ciclos de una y dos etapas de expansión súbita. En el rango de baja entalpía, predominó el isobutano como el fluido de trabajo que presentó mayores potencias, mientras que las eficiencias térmicas mayores se distribuyeron entre los cuatro fluidos en estudio. Las centrales de doble expansión súbita, obtuvieron en promedio un 26 % más potencia que su símil de una etapa de expansión, mientras que, en términos de eficiencia, las superaban en un 2 %. En cuanto al uso de agua pura como fluido geotérmico, se determinó que el decrecimiento en la entalpía calculada era cercano al 0,8 % para cada 1 % de sal en el geofluido, lo que se extrapoló a los valores de potencia obtenidos⁴.

Así también **GODINEZ** (2013) en su trabajo de tesis titulado “FACTIBILIDAD DE UN PROYECTO GEOTERMOELÉCTRICO PARA LA ZONA DE SAN MARCOS JALISCO” en el cual se evalúa la viabilidad técnica y económica de instalar una planta geotérmica en la zona de San Marcos, Jalisco. Por medio de la estimación del potencial geotérmico y el cálculo del costo nivelado de generación (CNG).

Para evaluar la viabilidad técnica, se calculó el potencial a instalar en la zona. Se llegó a la posible instalación de 21 MW para la zona de San Marcos, utilizando el método volumétrico del United States Geological Survey (USGS por sus siglas en inglés).

⁴ (Matamala Aviles, 2014)

Contexto nacional

CORDOVA (2007) en su tesis titulado “DISEÑO DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 50 MW”, su objetivo principal es el diseño de una planta geotérmica eléctrica de ciclo combinado, con una turbina de dos etapas y a potencia instalada de 50 MW. Dentro de los resultados obtenidos está el ciclo termodinámico y la selección de los componentes de la planta. Finalmente se concluye que el proyecto es viable, que la eficiencia energética de una planta de ciclo combinado aumenta en comparación de una planta tipo Single Flash y que el impacto ambiental de este tipo de centrales es mínimo comparado los combustibles fósiles.

APAZA & OLAZABAL (2014) , en su tesis titulado “La Energía Geotérmica Como Alternativa Económica Y Sostenible para solucionar el Déficit De Generación Eléctrica En La Zona Sur Del Perú” La presente investigación evalúa y analiza la relación causa efecto de las variables: “Energía geotérmica como alternativa económica y sostenible” y “Alternativa de solución del déficit de generación eléctrica de la zona sur del Perú”, encontrándose que el déficit de generación en dicha zona llegaba a un nivel promedio de 45%, siendo por ello proclive a los colapsos y consecuentes cortes de suministro eléctrico, entre los años 2008 al 2013.

En tal sentido; se ha simulado el despacho económico del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional – SEIN – para el escenario 2015 – 2016, con y sin la participación de una central geotérmica de 100 MW propuesta por el “Estudio de Pre Factibilidad del campo geotérmico de Calientes, Tacna – Perú”, desarrollado por la firma West Japan Engineering Company. Los resultados de las simulaciones

muestran que se lograría una significativa reducción del costo total operativo, siendo para el SEIN del orden del 14,8 % y para la zona sur específicamente del 42,0 %; consecuentemente, se tendría que el ahorro generado compensaría la inversión en un periodo de 3 años y 6 meses. Es decir, el SEIN en su conjunto se vería beneficiado en un plazo muy inferior al de la propia recuperación de la inversión. Paralelamente la participación de dicha Central Geotérmica en el sistema interconectado, contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero -GEI- en un rango de 4,14 % a 5,97 % en los años 2015 y 2016, a nivel de todo el SEIN.

En el contexto actual, los beneficios que una determinada tecnología ofrece al sistema eléctrico en su conjunto, no son objeto de un incentivo particular, aspecto que se considera debería ser materia de consideración, con el fin de lograr los beneficios que la energía geotérmica está en condiciones de brindar al país.

Para el caso de la economía del proyecto, se evaluó el costo nivelado de generación con el cual se hizo una comparación con los costos actuales de generación de México, sin embargo, no se tomaron en cuenta los factores externos, que podrían afectar los costos y por tanto el cálculo del costo nivelado. El CNG obtenido en el estudio es de 7,13 ¢USD/kWh.

El estudio indico que la creación de una planta geotérmica en la zona de San Marcos, Jalisco, es viable en teoría técnica y económicamente, aunque se sabe que todo estudio de potencial geotérmico tiene un grado de incertidumbre.

2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado

2.2.1. Energías renovables⁵

Para empezar, las energías renovables son la alternativa más limpia para el medio ambiente. Se encuentran en la naturaleza en una cantidad ilimitada y, una vez consumidas, se pueden regenerar de manera natural o artificial. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), frente a las fuentes convencionales, las energías renovables son recursos limpios cuyo impacto es prácticamente nulo y siempre reversible.

Entre los diferentes **tipos de energías renovables** encontramos los siguientes:

Energía hidráulica. Es la producida por la caída del agua. Las centrales hidroeléctricas en represas utilizan el agua retenida en embalses o pantanos a gran altura. El agua en su caída pasa por turbinas hidráulicas, que transmiten la energía a un alternador, el cual la convierte en energía eléctrica.

Energía eólica. Es la energía cinética producida por el viento. A través de los aerogeneradores o molinos de viento se aprovechan las corrientes de aire y se transforman en electricidad. Dentro de la energía eólica, podemos encontrar la eólica marina, cuyos parques eólicos se encuentran mar adentro.

⁵ <https://twenergy.com/a/que-son-las-energias-renovables-516>

Energía solar. Este tipo de energía nos la proporciona el sol en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente). El uso de la energía del sol se puede derivar en energía solar térmica (usada para producir agua caliente de baja temperatura para uso sanitario y calefacción) solar fotovoltaica (a través de placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar), etc.

Energía geotérmica. Es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas y se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor y ligada a volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres. Por tanto, es la que proviene del interior de la Tierra.

Energía mareomotriz. El movimiento de las mareas y las corrientes marinas son capaces de generar energía eléctrica de una forma limpia. Si hablamos concretamente de la energía producida por las olas, estaríamos produciendo energía undimotriz. Otro tipo de energía que aprovecha la energía térmica del mar basado en la diferencia de temperaturas entre la superficie y las aguas profundas se conoce como maremotérmica.

Energía de la biomasa. Es la procedente del aprovechamiento de materia orgánica animal y vegetal o de residuos agroindustriales. Incluye los residuos procedentes de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, así como los subproductos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera.

Las energías renovables son recursos abundantes y limpios que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones dañinas para el

medio ambiente como las emisiones de CO₂, algo que sí ocurre con las energías no renovables como son los combustibles fósiles. Una de sus principales desventajas, es que la producción de algunas energías renovables es intermitente ya que depende de las condiciones climatológicas, como ocurre, por ejemplo, con la energía eólica. Con todo, el IDAE apunta que, por su carácter autóctono, este tipo de energías "verdes" contribuyen a disminuir la dependencia de nuestro país de los suministros externos, aminoran el riesgo de un abastecimiento poco diversificado y favorecen el desarrollo tecnológico y la creación de empleo.

2.2.2. Geotermia⁶

Geotermia es una palabra de origen griego, deriva de “geos” que quiere decir tierra, y de “thermos” que significa calor: **el calor de la Tierra**. Se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil al ser humano (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo).

⁶ (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, pág. 14)

2.2.3. Antecedentes históricos de la geotermia⁷

La presencia de volcanes, fuentes termales y otros fenómenos termales debieron haber inducido a nuestros ancestros a suponer que el interior de la Tierra estaba caliente; sin embargo, no fue hasta los siglos XVI y XVII, cuando se excavaron las primeras minas a algunos cientos de metros de profundidad, observándose que la temperatura se incrementaba con la profundidad. Las primeras medidas, con termómetros, se realizaron en 1740 en una mina de Belfort, en Francia. Sin embargo, el aprovechamiento de esta energía se inicia en Toscana en 1777, cuando se detecta la presencia de ácido bórico en algunas fuentes termales, comenzando rápidamente su explotación; estas aguas contenían una concentración de boro del orden de un 0,5 por mil, observándose que esta concentración aumentaba con la temperatura del agua, descubriéndose así un método de obtención del boro. El ácido bórico se obtenía mediante evaporación de las aguas geotérmicas, usando como combustible la madera de los bosques de los alrededores. En 1827 Francisco Larderello, fundador de esta industria, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, en vez de quemar la madera de los bosques en rápido agotamiento. A lo largo del siglo XIX, se mejoraron estas explotaciones, se hicieron pequeños sondeos y se utilizó el vapor que se desprendía para concentrar el contenido en boro del agua termal. Entre 1850 y 1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de la producción de ácido bórico. Al comienzo del siglo XX, en la zona de

⁷ <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/geotermica/PDFs/01Geot.pdf>

Larderello, el vapor geotérmico seco se aprovecha para accionar una turbina de 5 kW, constituyendo la primera central geotérmica del mundo de generación de energía eléctrica; a partir de este momento comienza un desarrollo progresivo de esta fuente de energía, hasta alcanzarse en la actualidad los 500 MW; se extiende sobre una superficie de 200 km², por lo que dada su gran extensión, se hizo necesario multiplicar los sondeos de esta explotación, ampliando asimismo el número de centrales geotérmicas, que están bastante próximas a los sondeos, con los que están conectadas mediante conducciones de gran diámetro aisladas térmicamente. Otros países también empezaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escala industrial. En 1892 entró en operaciones el primer sistema de calefacción geotermal, en Boise, Idaho (USA). En 1919 se perforan los primeros pozos geotérmicos de Japón, en Beppu. En 1921 los pozos The Geyser, California, USA, y en el Tatio, Chile. En 1928 Islandia, otro país pionero en la utilización de la energía geotérmica, inicia la explotación de sus fluidos geotérmicos (principalmente agua caliente) para calefacción doméstica. Entre 1910 y 1940 el vapor de agua de baja presión se utiliza para calefactar invernaderos, edificios industriales y residenciales, en esta parte de Toscana. En 1958 entra en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelanda, y en 1959 otra en México. La energía geotérmica se empezó a utilizar en Estados Unidos en 1960, cuando se usó vapor seco de los géiseres al norte de San Francisco para generar 11 MW de energía eléctrica. Las condiciones del vapor de estos géiseres son de alrededor de 7,6 Atm y 180°C; en 1980, las plantas

geotérmicas de este lugar producían unos 800 MW de potencia y hacia 1990 esta capacidad se ha casi duplicado⁸.

2.2.4. Energía geotérmica⁹

Por definición, la energía geotérmica es aquella que proviene del calor existente en el interior de la Tierra; como es sabido, este calor fluye desde el centro del planeta hasta el exterior. Este fenómeno se manifiesta a través de lo que se conoce como gradiente geotérmico, esto es un aumento de temperatura con la profundidad en el subsuelo terrestre (ver Figura N° 7). El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre; en este sentido utilizaremos dicho término (Cordova Zapata, 2007).

⁸ <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/geotermica/PDFs/01Geot.pdf>

⁹ (Cordova Zapata, 2007)

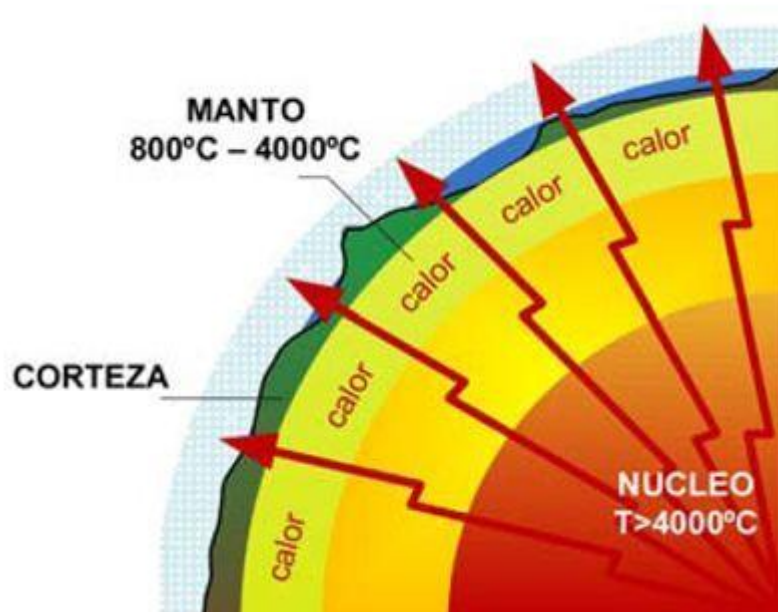


Figura N° 7: Energía geotérmica

Fuente: <https://www.cymper.com/blog/geotermia-i-aplicaciones-de-la-energia-geotermica/>

La tierra se define como un sistema de fluidos en mutua interacción. La Tierra tiene distintas formas de energía intrínseca. Entre ellas, las de mayor interés son la cinética, elástica y térmica, entre las cuales además existe un intercambio permanente. La geotermia corresponde a la energía térmica interna de la Tierra. La tecnología actual permite diversas formas de aprovechamiento de esta energía con el fin de convertirla en energía útil calor, electricidad.

2.2.5 Aplicaciones de la energía geotérmica

La energía geotérmica puede ser usada tanto para la generación de electricidad, así como para el sector comercial, industrial, y residencial en

una gran diversidad de actividades conocidas como usos directos en función de la temperatura que presente el fluido geotérmico.

Usos directos

La totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso almacén de recursos geotérmicos de muy baja temperatura ($< 30^{\circ}\text{C}$), siendo recursos abundantes, versátiles y apropiados para diferentes tipos de utilización.

Otra gran ventaja de este tipo de sistemas es que las condiciones geológicas para su aprovechamiento son poco exigentes, por lo que prácticamente en cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad (aproximadamente a unos 15m), debido en gran medida a la enorme inercia térmica de los materiales geológicos que componen la corteza, la temperatura permanece estable (zona neutra), entre $7\text{-}15^{\circ}\text{C}$ y hasta 22°C . (Piedra Lara, 2011)

El calor geotérmico se utiliza directamente o través de bombas geotérmicas (en masas de agua o acuíferos poco profundos), sin la participación de una central eléctrica, para una variedad de aplicaciones tales como calefacción, refrigeración, preparación de alimentos, baño de aguas termales, agricultura, acuicultura, invernaderos, entre otros. Es una alternativa válida para procesos de generación de calor y refrigeración en especial para la climatización de los edificios. (Piedra Lara, 2011)

Actualmente son varios los países que utilizan el calor geotérmico en procesos industriales, agrícolas y de ambientación entre los principales se tiene a Rusia,

Hungría, Nueva Zelanda, EE.UU e Islandia, siendo este último el país con mayor actividad geotérmica del mundo, el 99 % de las viviendas utilizan la energía geotérmica para calefacción. La Figura N° 8 muestra los potenciales usos de los diferentes fluidos geotermales a diferentes temperaturas.

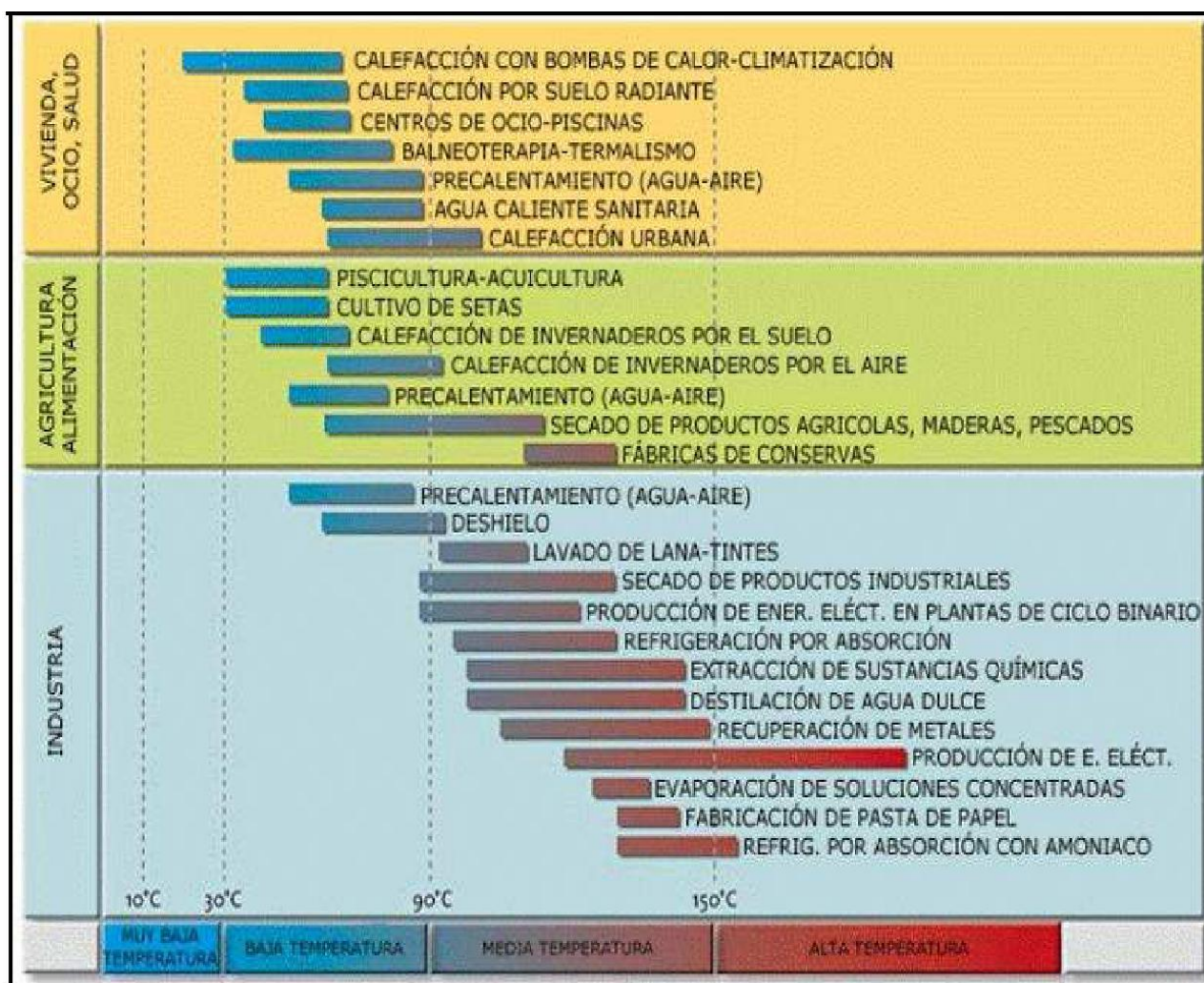


Figura N°8: Aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura

Fuente: (Pedro Lara, 2011, pág. 40)

Actualmente con la incursión de plantas de ciclo binario se puede generar energía eléctrica en fluidos con temperaturas superiores a los 90°C. (Pedro Lara, 2011)

Hay varios métodos de extracción de energía del subsuelo para transformarlo en calor entre los más conocidos se tiene, sondas verticales, colectores horizontales y pozos de agua. Las instalaciones geotérmicas son compactas, están diseñadas para una vida útil de aproximadamente 30 años, muy por encima de la vida útil de un sistema convencional. Son sistemas de alto rendimiento, reduciendo el consumo de electricidad en un 30-60 % en comparación con los sistemas tradicionales de climatización, porque la electricidad que alimenta a las mismas se utiliza sólo para recoger, concentrar, y entregar el calor más no para producir. (Piedra Lara, 2011)

Generación eléctrica¹⁰

Desarrollar electricidad es la forma de utilización más importante a partir de recursos geotérmicos de alta temperatura ($> 150^{\circ}\text{C}$), mediante un ciclo similar a las centrales termoeléctricas convencionales. Los pozos perforados en un reservorio geotérmico, transportaran el fluido de forma concentrada a la superficie, donde esta energía térmica será convertida en electricidad en una central de energía geotérmica. (Piedra Lara, 2011)

¹⁰ (Piedra Lara, 2011)

2.2.6 Energía geotérmica en el mundo¹¹

La energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas y se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor y ligada a volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres. Los recursos geotérmicos de alta temperatura se aprovechan principalmente para la producción de electricidad, cuando se trata de yacimientos de alta temperatura (superiores a los 100-150°C). Cuando la temperatura del yacimiento no es suficiente para producir energía eléctrica sus principales aplicaciones son térmicas en los sectores industrial, servicios y residencial.

Hasta ahora, la utilización de esta energía en el mundo ha estado limitada a áreas en las cuales las condiciones geológicas eran muy favorables. Pero los avances tecnológicos actuales en equipos y las mejoras en la prospección y perforación, permiten a la geotermia a día de hoy disponer de tecnología para la producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos de temperaturas notablemente inferiores a las que se precisaban años atrás.

En 2015, la industria geotérmica añadió a la red 313 MW de capacidad instalada, potencia inferior a la añadida en años anteriores, pero con un número similar de plantas, en su mayoría pequeñas instalaciones binarias en países como Turquía, Kenia, México, Japón, Alemania y Estados Unidos.

¹¹ <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

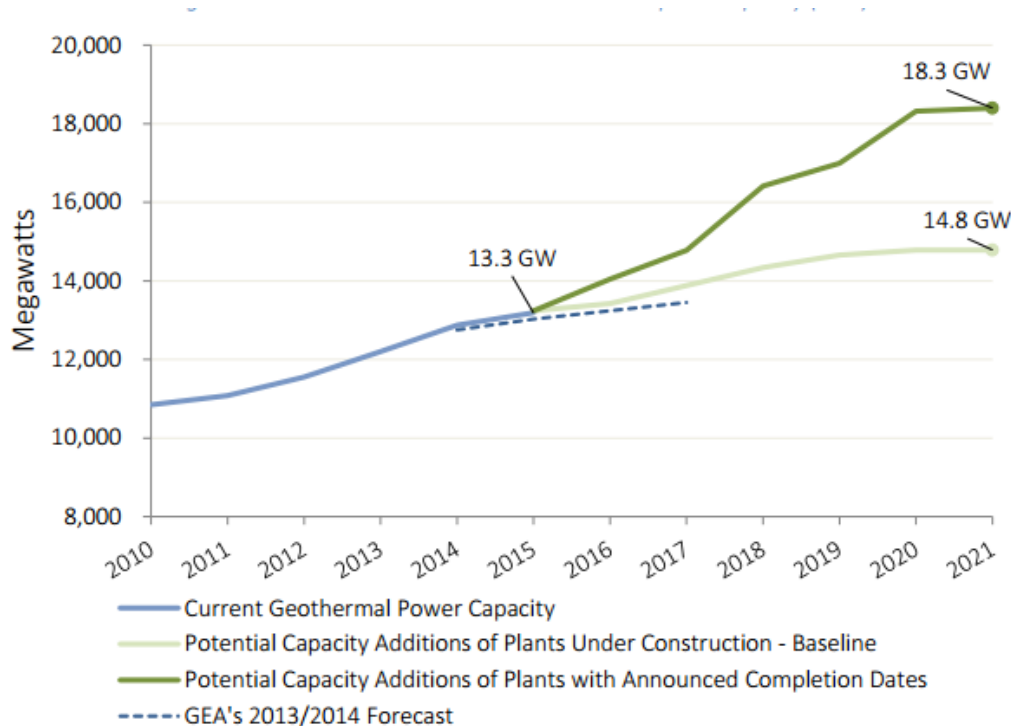


Figura N° 9: International Geothermal power Nameplate capacity (MW)

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

En total, **el mercado geotérmico mundial alcanzó los 13,3 GW (gigavatios) de potencia instalada repartida entre un total de 24 países.** Pero a finales de año había 12,5 GW de proyectos en desarrollo que supondrán importantes adiciones de capacidad a través de 700 a 750 proyectos repartidos entre 82 países.

Se espera que en catorce de estos 82 países se pongan en marcha 2 GW de nueva potencia en los próximos 3-4 años en base a una lista de proyectos en construcción ligados a acuerdos de compra de energía a largo plazo (PPA). Según los últimos informes, **se prevé que el mercado mundial llegue a los 18,4 GW en 2021.**

El conservador pronóstico de 18,4 GW previsto se compone de las plantas que se terminarán en ese plazo y que ya están en construcción. Como los proyectos tardan

en realizarse entre 2-3 años y el plazo es de cinco años, es probable que en los próximos dos años se anuncien nuevos proyectos, que se sumarán a ese pronóstico conservador.

El crecimiento de **la nueva capacidad tendrá lugar en los mercados de Europa, África Oriental y del Pacífico Sur**, que son las regiones que lideran en la actualidad el crecimiento de energía geotérmica y que registrarán aumentos sustanciales de la capacidad en los próximos cinco años.

Mercado global

De acuerdo con la recopilación de datos de la **Asociación de Energía Geotérmica (GEA)**, hay **más de 200 GW de potencial hidrotérmico convencional disponible a nivel mundial** en base al conocimiento y la tecnología actuales. El **Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)** llegó a más o menos a la misma conclusión. Por lo tanto, las comunidades y los gobiernos de todo el mundo sólo han aprovechado el 6-7 % del potencial mundial total de energía geotérmica en base al conocimiento geológico y tecnológico actual.

En el gráfico 2 (abajo) representa la capacidad operativa global por países, que lidera Estados Unidos con más de 3,5 GW, seguido de Filipinas (1,9 GW), Indonesia (casi 1,4 GW) y México (más de 1 GW).

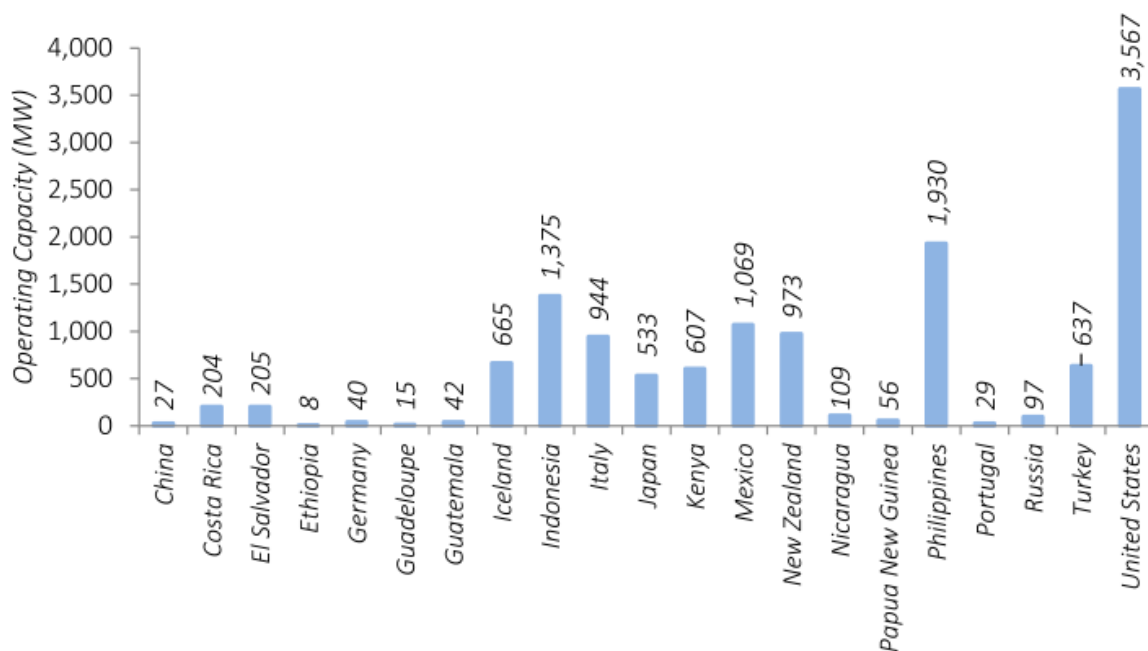


Figura N° 10: Goethermal Power Operating Capacity by Country

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

En este otro gráfico (abajo) se enumeran los proyectos planificados y las sumas de capacidad actualizadas a finales de 2015. Sobre la base de la trayectoria actual del mercado y los proyectos en tramitación, es probable que en la próxima década Filipinas, Indonesia o Europa alcancen a Estados Unidos, país en el que el desarrollo de la energía geotérmica ha disminuido en los últimos tiempos.

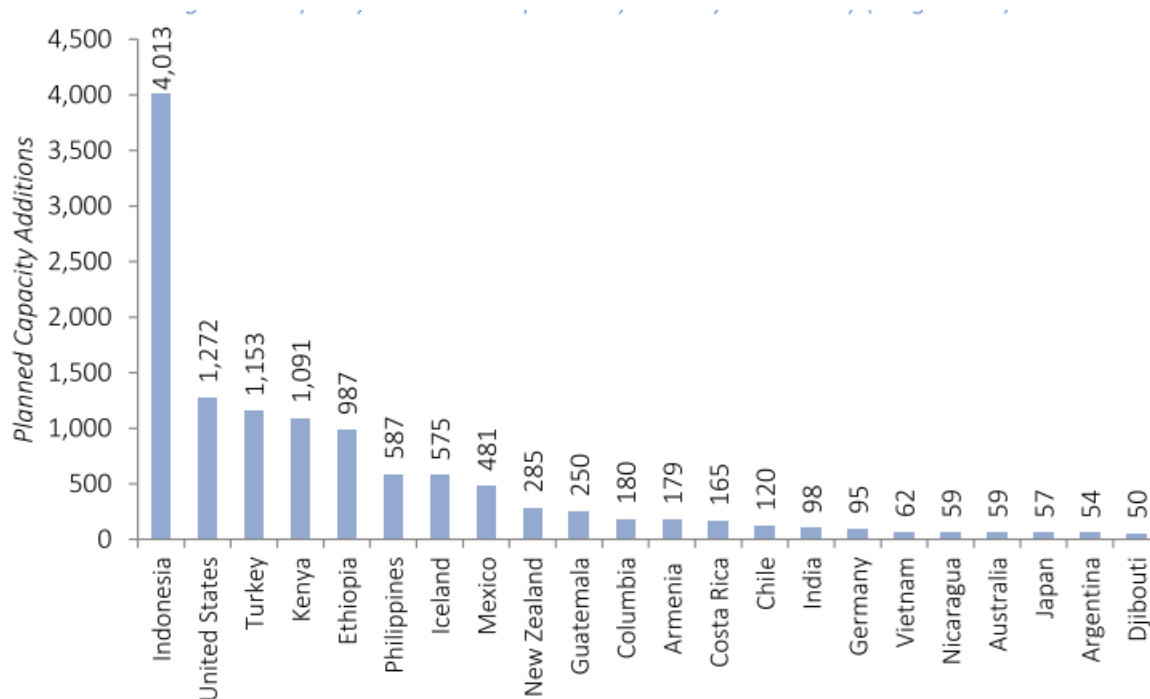


Figura N° 11: Capacity under Development by Country or territory (Mw)

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

Los proyectos de energía geotérmica continúan expandiéndose en todo el mundo. En toda América Central y del Sur la geotérmica está creciendo. **El Salvador planea alcanzar una cuota del 40 % de energía geotérmica en su mix energético a finales de 2019** y va por el buen camino para lograr su objetivo. **Chile ha puesto en operación su primera planta de energía geotérmica en Cerro Pabellón. Costa Rica** ha asegurado una línea de crédito de 500 millones de dólares de la **Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA)** para **añadir hasta 165 MW de capacidad de generación de energía geotérmica en los proyectos de Pailas y Borinquen**, y Nicaragua ha ampliado los incentivos para las energías renovables en 2015 para alcanzar su objetivo del 90% de renovables para el 2020.

África oriental es otro foco regional de la actividad geotérmica, con varios países próximos a construir sus primeras plantas de esta tecnología. **Tanzania se ha**

comprometido a inyectar 220 MW geotérmicos a la red eléctrica para el 2020.

Mientras tanto, **Kenia ahora exporta algunos de sus excesos capacidad geotérmica a las vecinas Ruanda y Uganda**, mientras que la generación de la mitad de su electricidad con energía geotérmica.

En América del Norte, **México ha incrementado su compromiso con el mercado geotérmico y está tomando medidas importantes para construir nuevos proyectos y ampliar los campos existentes.** A mediados de 2015, México emitió nuevas reglas para el arrendamiento de geotérmica privada, requisitos legales, técnicos, administrativos y financieros, así como los procedimientos necesarios para obtener un registro, permiso o concesión.

Por último, la cantidad de países que están construyendo proyectos geotérmicos sigue creciendo. Entre los nuevos jugadores del mercado geotérmico se incluyen organizaciones en países de Oriente Medio, como Arabia Saudita, Irán y Pakistán, todos los cuales han anunciado sus intenciones de construir proyectos o metas de desarrollo geotérmico a corto plazo.

El Periódico de la Energía ha buceado en el mundo de la geotérmica para realizar un nuevo ránking de **“las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo”**. En este caso, el Top 10 está más repartido que en otras tecnologías. Filipinas comanda la clasificación con tres representantes, seguida de Estados Unidos, con dos, y la clasificación se completa con un representante de México, Italia, Kenia, Indonesia e Islandia.

1. Complejo Geotérmico The Geysers. 1808 MW. Estados Unidos



Figura N° 12: Sonoma Calpine 3, una de las plantas del complejo geotérmico The Geysers.

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico The Geysers** situado a unos 116 kilómetros al norte de San Francisco, California, se compone de 21 plantas de energía que la convierten en la instalación geotérmica más grande en el mundo. El complejo cuenta con una capacidad instalada de 1808 MW y una capacidad de producción activa superior a los 1000 MW trabajando sólo al 63 % de su capacidad de producción

Calpine Corporation es propietaria de un total de 19 plantas de energía en el complejo, proporcionando una capacidad de generación neta combinada de alrededor de 725 MW, mientras que las otras dos plantas de energía son propiedad conjunta de la **Northern California Power Agency, Silicon Valley Power** y **US Renewables Group**.

Las instalaciones en conjunto cubren un área de aproximadamente 78 km², cuya producción del campo geotérmico comenzó en 1960 y alcanzó su punto máximo en la década de 1980. Por otra parte, los proveedores de las turbinas para las plantas de energía en el complejo incluyen a **Toshiba** y **Mitsubishi Steam**.

3. Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México



Figura N° 13: .Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

Con 820 MW de potencia instalada, la **Central de Energía Geotérmica Cerro Prieto** situada en el sur de Mexicali, en Baja California al norte de México, es la segunda mayor instalación geotérmica en el mundo. La planta de energía, al igual que todos los otros campos geotérmicos en México, se encuentra en propiedad y operada por la eléctrica pública **Comisión Federal de Electricidad (CFE)**.

La central cuenta con cinco plantas, que constan de 15 unidades. La primera planta fue puesta en servicio en 1973, mientras que la quinta fue puesta en servicio en 2012. La primera, la CP1 cuenta con una capacidad de 180 MW alimentada por 4 turbinas de tipo flash único de 37,5 MW más una de 30 MW; CP2 y CP3, tienen 220 MW de capacidad cada una, sumado cuatro turbinas doble flash de 110 MW; CP4 y CP5, con 100 MW cada una, la primera con cuatro turbinas de 25 MW y CP5, dos turbinas de 50 MW. Todas han sido suministradas por **Toshiba** y **Mitsubishi Heavy Industries**.

3. Complejo Geotérmico Larderello. 769 MW. Italia

-



Figura N° 14: Complejo Geotérmico Larderello. 769 MW. Italia

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Larderello**, que consta de 34 plantas con una capacidad neta total de 769 MW, es la tercera mayor instalación de energía geotérmica del mundo. La energía producida en el campo geotérmico, situado en la Toscana, Italia Central, representa el 10% por ciento de toda la energía geotérmica producida en el mundo y atiende al 26,5% de las necesidades energéticas regionales.

Enel Green Power es propietaria de las plantas de energía en el complejo que prestan servicio aproximadamente a dos millones de familias, 8.700 clientes comerciales y 25 hectáreas de invernaderos. Las profundidades de las reservas en el rango del campo geotérmico oscilan entre los 700 y los 4.000 metros bajo la superficie. La primera planta en el campo geotérmico fue encargada hace ya más de un siglo, en 1913, siendo por tanto la primera de su tipo en el mundo.

La primera planta de energía de Larderello tenía una capacidad de generación de 250 kW, que comprendía de una turbina diseñada y construida por los ingenieros de **Tosi Electromechanical Company**. Las plantas geotérmicas en el campo fueron reconstruidas después de que quedasen destruidas durante la Segunda Guerra Mundial.

4. Complejo geotérmico Olkaria. 540 MW. Kenia



Figura N° 15: Complejo geotérmico Olkaria. 540 MW. Kenia

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

La **central geotérmica Olkaria** es la mayor planta de su tipo en Kenia y la cuarta del mundo, con una capacidad instalada de 540 MW entre las cuatro fases, a los que se sumarán 140 MW de la quinta fase que se está desarrollando en la

actualidad. El complejo se halla ubicado en el Parque Nacional de Hell Gate, en Olkaria, condado de Nakuru en el borde oriental del Valle del Rift, aproximadamente a 33 kilómetros por carretera, al suroeste de Naivasha y a 120 km al noroeste de Nairobi , la capital de Kenia.

Con la entrada en servicio de la unidad IV (140 MW) del complejo Olkaria a principios de 2015, la geotérmica pasó a ser la primera fuente de generación de electricidad del país al superar por primera vez a la energía hidráulica. La construcción del complejo ha sido posible gracias a la financiación del **BEI, el Banco Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Gobierno de Kenia, la Agencia Francesa de Cooperación y la Agencia de Cooperación de Alemania**, entre otros.

El proyecto ha sido desarrollado en sus distintas fases por la india **KEC**, las japonesas **Toyota Tshusho** y **Mitsubishi Heavy Industries**, la coreana **Hyundai Engineering** y **Sinclair Knight Merz**, de Nueva Zelanda. El complejo geotérmico es propiedad de la eléctrica pública **Kenya Electricity Generating Company (Kengen)**.

5. Complejo Geotérmico Makban. 458 MW. Filipinas



Figura N° 16: Complejo Geotérmico Makban. 458 MW. Filipinas

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Makban**, también conocido como **Plantas de Energía Makiling-Banahaw**, se encuentra en los municipios de Bahía y Calauan en la provincia de Laguna y, Santo Tomás, en la isla de Luzón. Es la quinta mayor instalación de energía geotérmica en el mundo, con una capacidad de producción de 458 MW.

El complejo de energía geotérmica es propiedad de **AP Renewables**, una subsidiaria de Aboitiz Power. El complejo consta de seis plantas de energía que comprenden de 10 unidades, incluyendo una planta binaria con cinco unidades de 3 MW y una unidad 0,73 MW. Las instalaciones, con una superficie de 700 hectáreas, inició sus operaciones en 1979, siendo **Mitsubishi Heavy**

Industries uno de los principales proveedores de turbinas para las plantas del complejo.

6. Complejo Geotérmico Salton Sea. 340 MW. Estados Unidos



Figura N° 17: Complejo Geotérmico Salton Sea. 340 MW. Estados Unidos

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Salton Sea** incluye un conjunto de 10 plantas de generación de energía geotérmica en Calipatria, cerca del Mar de Salton en el Valle Imperial de California del Sur. Con una capacidad de generación combinada de 340 MW, es la sexta instalación geotérmica más grande en el mundo.

CalEnergy Generation, el operador del campo, tiene una participación del 50% en las instalaciones, mientras que el restante 50 % está en manos de **MidAmerican Geothermal**, siendo la energía generada suministrada a **Southern California Edison Company**.

La Unidad 1 de una capacidad de producción de 10 MW fue la primera en entrar en funcionamiento en 1982, que fue construida por una empresa mixta formada por

la **Union Oil Company** y la Southern California Edison. CalEnergy Generation actualmente está desarrollando nuevos proyectos en la zona, incluyendo el **Black Rock Project**, que incrementará la capacidad geotérmica de la zona.

7. Complejo Geotérmico Hellisheidi. 303 MW. Islandia



Figura N° 18: Complejo Geotérmico Hellisheidi. 303 MW. Islandia

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Hellisheidi** es una planta de producción combinada de calor y electricidad (CHP) de vapor flash situada en el monte Hengill, aproximadamente a 20 kilómetros al este de la capital, Reykjavik. La planta tiene una capacidad de producción de 303 MW de energía eléctrica y 400 MW de energía térmica.

Propiedad de **Orkuveita Reykjavíkur**, se trata de la sexta instalación geotérmica más grande del mundo, construida por **Mannvit Engineering** y **Verkís**

Engineering. La energía generada a partir de la planta se suministra principalmente a las refinerías de aluminio que se localizan en las proximidades.

Las instalaciones fueron construidas en cinco fases entre 2006 y 2011, cubriendo un área total de aproximadamente 13,000 m². Seis turbinas de alta presión (HP) de la central eléctrica fueron suministradas por los ingenieros de **Mitsubishi**, mientras que una turbina de baja presión (LP) fue entregada por **Toshiba**.

8. Complejo Geotérmico Tiwi. 289 MW. Filipinas



Figura N° 19: Complejo Geotérmico Tiwi. 289 MW. Filipinas

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Tiwi** se sitúa en en la provincia de Albay, a unos 300 kilómetros al sureste de Manila. Con 289 MW (neto), es la octava instalación geotérmica más grande en el mundo, siendo propiedad, como el complejo de

Makban, de AP Renewables, una filial de **Aboitiz Power**. El complejo se compone de tres plantas de energía que disponen de dos unidades cada una.

Los trabajos de perforación en el campo geotérmico se iniciaron en 1972, entrando las instalaciones en funcionamiento en 1979. El proyecto fue desarrollado por la **National Power Corporation y Philippine Geothermal**, mientras que **Mitsui y F.F. Cruz** fueron los contratistas principales. Por otra parte, todas las plantas de energía cuentan con unidades generadoras de **Toshiba**.

9. Complejo Geotérmico Darajat. 259 MW. Indonesia



Figura N° 20: Complejo Geotérmico Darajat. 259 MW. Indonesia

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Darajat** situado en Garut, en el Distrito de Pasirwangi en Java Occidental, es la décima mayor instalación geotérmica en el mundo con una

capacidad instalada de 259 MW, la cual está gestionada por **Darajat GPP Amoseas Indonesia**, una subsidiaria de **Chevron Texaco**.

Las instalaciones constan de tres plantas que proveen electricidad a las provincias de Java y Bali. Las plantas que la conforman fueron entregadas respectivamente en 1994, 2000 y 2007, compartiendo las plantas II y III instalaciones comunes, incluyendo el sistema de recolección de vapor.

La última planta fue construida por **Thiess Contractors Indonesia** en colaboración con **Kanematsu Corporation**, la cual cuenta con una turbina suministrada por los ingenieros de **Mitsubishi Heavy Industries (MHI)**, quienes también proveyeron la turbina para la segunda planta. Además, **Hyundai Engineering** suministró los equipos para las dos primeras plantas.

10. Complejo Geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas



Figura N° 21: Complejo Geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas

Fuente: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

El **Complejo Geotérmico Malitbog** de 233 MW, situado aproximadamente a 25 kilómetros al norte de la ciudad de Ormoc, en la isla de Leyte, es la décima instalación de energía geotérmica más grande del mundo. La planta fue propiedad de **Visayas Geothermal Power Company (VGPC)**, que posteriormente transfirió los derechos de propiedad a la **Philippine National Oil-Energy Development Company (PNOC)**.

La construcción de las instalaciones de energía geotérmica de Malitbog, llevadas a cabo por **Sumitomo Corporation** y **Fuji Electric**, comenzaron en 1993 y terminaron en 1996. El complejo cuenta con tres turbinas de condensación de flujo doble de un solo cilindro de 77,5 MW suministradas por Fuji Electric.

2.2.7. Energía geotérmica en América Latina

Según el Instituto Geólogo y Metalúrgico (INGEMMET, 2014, pág. 6)

La conformación geodinámica de la costa del Pacífico, en América Latina y el Caribe, ofrece las condiciones necesarias para la formación de yacimientos geotérmicos. Desde México hasta Argentina, se tienen aproximadamente 50 770 MWe de potencial geotérmico, donde actualmente, y por muchas razones, solo 1 169 MWe -menos del 2 % de este recurso- han sido desarrollados (Battocletti, 1999), ver tabla N° 2. Del cuadro anterior se tiene que Centroamérica posee el 38,7 % de recursos geotermales, mientras que el Caribe tiene 32,1 % y América del Sur

Tabla N° 2: Potencial geotérmico en América central, el caribe y América del Sur

País	Capacidad geotermal instalada (MW _e)	Potencial geotérmico (MW _e)
Argentina	0.67	2 010
Bolivia	-	2 490
Chile	-	2 350
Colombia	-	2 210
Costa Rica	152.50	2 900
Dominica	-	1 390
Ecuador	-	1 700
El Salvador	160.00	2 210
Granada	-	1 110
Guadalupe	4.50	3 500
Guatemala	29.00	3 320
Honduras	-	990
Jamaica	-	100
Marínica	-	3 500
México	751.88	6 510
Montserrat	-	940
Antillas Holandesas	-	3 000
Nicaragua	70.00	3 340
Panamá	-	450
Perú	-	2 990
San Kitts & Nevis	-	1 280
Santa Lucía	-	680
San Vicente & Las Granadinas	-	890
Venezuela	-	910
Total	1 168.55	50 770

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 7)

el 29,2 %. Asimismo, el Perú cuenta con el 5,89 %, ocupa el séptimo lugar en la región y, a nivel de Sudamérica, posee más del 20 %, siendo el país de esta parte del continente con mayores recursos geotérmicos.

Si los países de la región que actualmente no están explotando sus recursos geotermales pudieran disponer de ellos, contarían con una gran alternativa energética que contribuiría a su desarrollo. (INGEMMET, 2014, pág. 7)

2.2.8. Energía geotérmica en Perú¹²

La evaluación del potencial geotérmico en el Perú se inició en los años 70 con el inventario de fuentes termales a nivel de todo el territorio peruano (Ingemmet). Estos estudios fueron realizados por el Servicio Geológico del Perú, Ingeomin – posteriormente Ingemmet-. Luego se emprendieron varios trabajos específicos relacionados a la evaluación del potencial geotérmico del Perú, tanto por iniciativa privada, pública y a través de la Cooperación Técnica Internacional.

En 1988, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) auspició un estudio similar en la zona (Electrosur S.A.). En el año de 1999, en virtud al convenio de cooperación técnica IPEN-PET, se efectuó el proyecto denominado PER 08/012 “Estudio del Potencial Geotérmico del Altiplano Sur”, realizado parcialmente a nivel de prefactibilidad. A finales del 2006, por iniciativa del Minem, y en base a la suscripción del “Memorándum de Entendimiento” entre el Minem y el Japan Bank International Cooperation (JBIC), Ingemmet retoma los estudios de “Evaluación del Potencial Geotérmico del Perú”, realizando investigaciones de exploración geológica y geoquímica de las manifestaciones geotermales por regiones. La

¹² (INGEMMET, 2014, pág. 7)

finalidad fue contar con una base técnico-científica, que permitiera conocer el verdadero potencial geotérmico del país y, de esta manera, promover actividades de exploración y explotación de nuestros recursos geotérmicos en sus diversas escalas.

En el año 2008, el Ingemmet realiza la actualización del Mapa Geotérmico del Perú (Vargas, 2008), ver figura N° 22, en el cual se muestran 6 regiones geotérmicas. La región Moquegua se localiza en la región 5, donde las manifestaciones geotermiales están asociadas a fluidos de origen volcánico y en algunos casos mixtos; es decir, la acción del agua meteórica que se infiltra al subsuelo y en profundidad se ve influenciada por alguna fuente de calor, asociada en su mayoría a la actividad magmática.

Las mayores reservas de energía geotérmica se localizan en el eje volcánico sur, o región V. Asimismo, desde la década de los 90, esta es la región más estudiada del país.

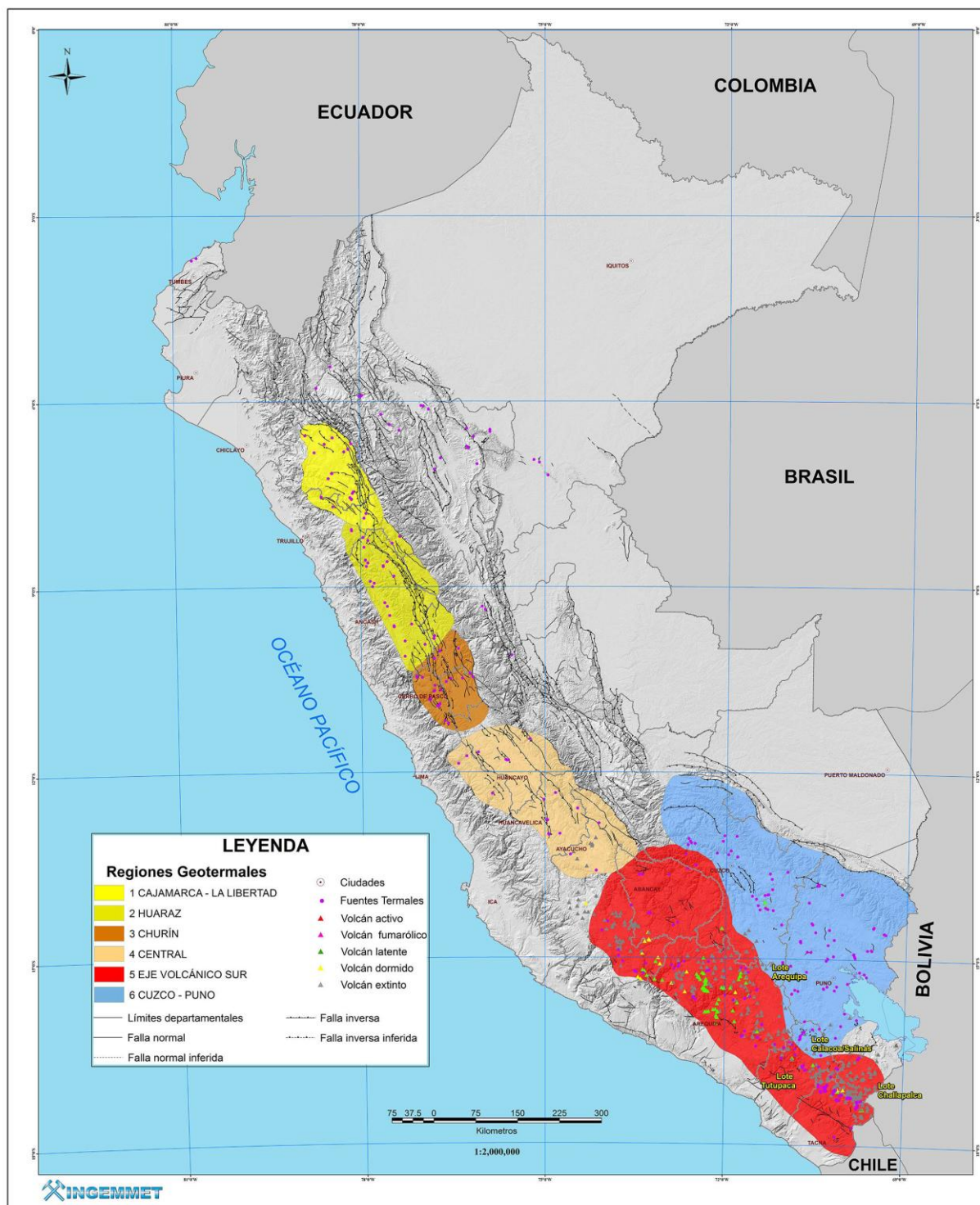


Figura N° 22: Mapa geotérmico del Perú

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 7)

2.2.9. Energía geotérmica en Moquegua

Según el documento (INGEMMET, 2014, pág. 135) señala que:

Moquegua es considerada la región geotermalmente más importante del país, seguida de Tacna, por contar con seis zonas geotérmicas de entalpía media y alta, localizadas por encima de los 4000 m s. n. m., con manifestaciones como fuentes termales, fumarolas y géiseres de temperaturas elevadas que alcanzan en algunos casos hasta los 90 °C en superficie, y en profundidad desde los 130 °C hasta por encima de los 200 °C, calculados a través de los geotermómetros químicos. (INGEMMET, 2014)

El potencial geotérmico de la región Moquegua está relacionado con la ubicación de las zonas geotermales a lo largo del borde activo de la placa continental, donde la placa de Nazca está subduciéndose bajo la placa Sudamericana. Este proceso de subducción ha generado actividad magmática y está asociado con altos flujos de calor desde el Jurásico a lo largo del flanco oeste de los Andes peruanos (Steinmüller et al., 2000). Las rocas del basamento en la zona sur de la cordillera volcánica del Perú son de edad mesozoica. El componente mesozoico está conformado por unidades estratigráficas cuyas edades van del Jurásico medio al Cretáceo, contienen sílice, carbonato y rocas volcánicas. (INGEMMET, 2014)

El componente cenozoico consiste principalmente de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Paleoceno al Pleistoceno (Steinmüller et al., 2000). Las estructuras geológicas regionales están dentro de las líneas de tendencia NE-SO que comprenden la posición de los principales volcanes en el área sur de la cordillera volcánica. Aparte de esas características

andinas, existen, además líneas de tendencia NE-SO que describen los bloques estructurales (Steinmüller et al., 2000).

Asimismo, en la región se tiene registrada la presencia de 25 centros volcánicos (Fidel et al., 1997), de los cuales destacan por su actividad reciente, los volcanes Ubinas, Ticsani y Huaynaputina. Todos los centros volcánicos tienen un control estructural regional NE-SO, y las aguas termales están asociadas a estos. Estos fenómenos volcánicos y estructurales han originado que las rocas volcánicas y el basamento estén fuertemente fracturados, factor que controla la recarga, circulación y descarga de los fluidos geotérmicos, sea en zonas profundas o superficiales. Las altas temperaturas registradas en las manifestaciones se deben principalmente a que existen fuentes de calor (cámaras magmáticas)

Estimación Del Potencial Geotérmico¹³

La estimación del potencial geotérmico para las zonas geotermales promisorias de la región de Moquegua fue calculada considerando información geológica y geoquímica básica. (INGEMMET, 2014)

En este sentido, fue necesario hacer suposiciones y cálculos basados en la experiencia de los expertos de la West Japan Engineering Consultants y en el conocimiento de la región, principalmente en ciertas zonas en las que la información era insuficiente.

El método de trabajo se basó en la investigación y la aplicación de modelos matemáticos y simulaciones probabilísticas, siendo el método volumétrico en combinación con el análisis de Montecarlo, que se describen más

¹³ (INGEMMET, 2014, pág. 135)

adelante, los que permitieron calcular el potencial geotérmico para la generación de energía eléctrica de cada zona geotermal.

Resultados De Cálculo¹⁴

Según el documento (INGEMMET, 2014) el resultado que se obtuvo del cálculo de la capacidad de generación de electricidad de cada una de las zonas geotermales promisorias (en MWe) se muestra en la tabla N° 3. Los valores estimados por combinaciones aleatorias de parámetros están dados en función de la confiabilidad de combinación aleatoria. El rango de valores de potencial estimado es amplio y se escoge como valor representativo el 80 % de confiabilidad.

Los resultados se resumen en la tabla N° 3. El total del potencial geotérmico de las zonas geotermales promisorias de la región Moquegua se estima cerca de 240 MWe.

Tabla N° 3: Potencial geotérmico para las zonas geotermales de la Región Moquegua

Potencial geotérmico estimado para las zonas geotermales de la región Moquegua (West Japan Engineering Consultants, 2012)

Provincia	Zona geotermal	Potencial de recurso en nivel de confianza del 80 % (MWe)	Capacidad de la planta (MWe)
Mariscal Nieto	Titre-Puente Bello	39.7	35
Mariscal Nieto	Jesús María	17.3	10
Mariscal Nieto	Calacoa	108.2	100
General Sánchez Cerro	Ullucán	27.4	25
General Sánchez Cerro	Ubinas	-	-
Mariscal Nieto	Crucero	79.4	70

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 137)

¹⁴ (INGEMMET, 2014)

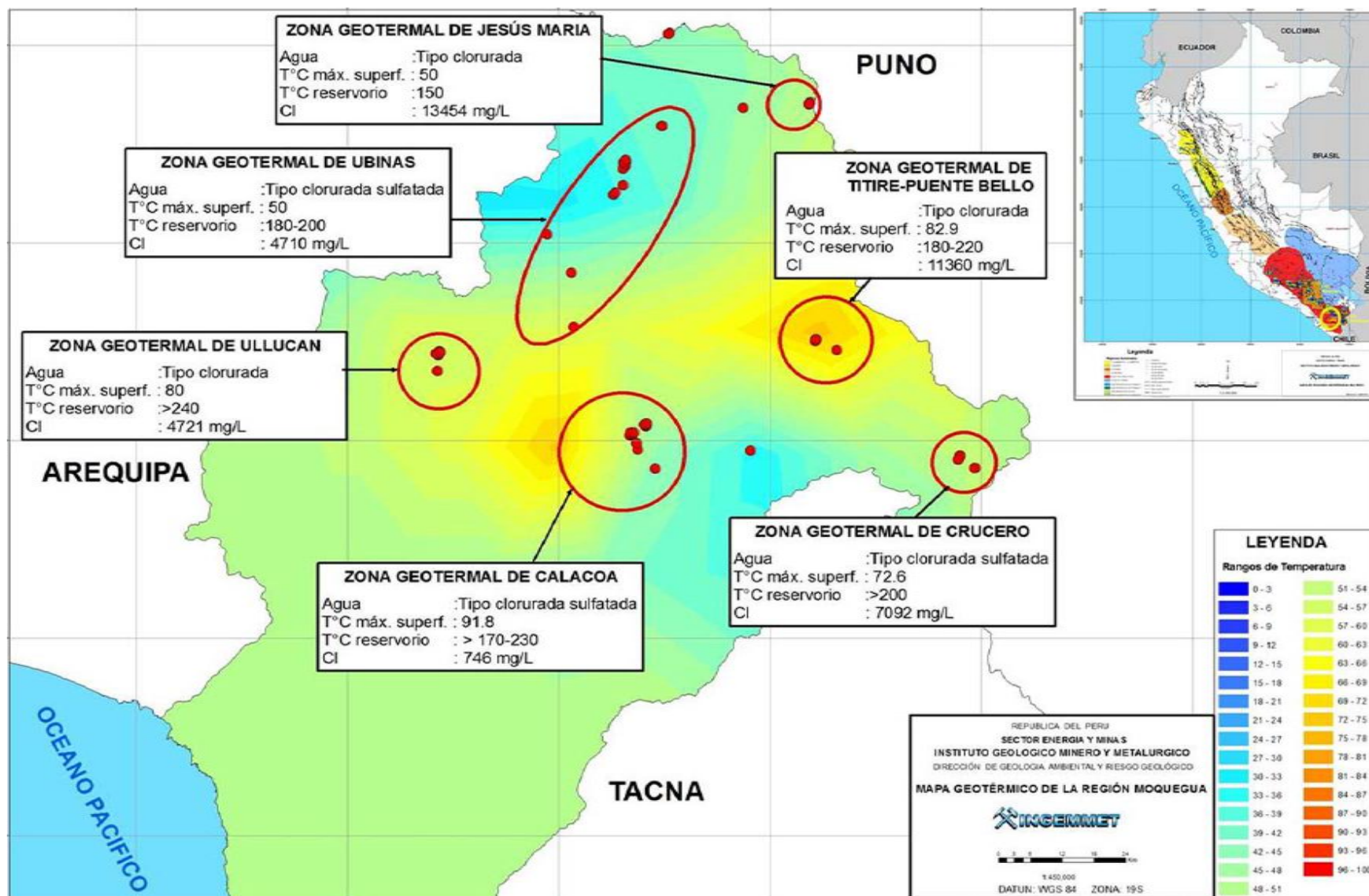


Figura N° 23: Mapa geotérmico de la Región Moquegua

2.2.10. Flujo de calor de la tierra y gradiente geotérmico¹⁵

Las grandes diferencias de temperatura entre la superficie de la Tierra y las existentes en su interior originan un flujo continuo de calor hacia la superficie, estimándose que la energía que llega cada segundo a la superficie terrestre, en forma de calor, por conducción, convección (ver Figura N° 24)

A unos pocos kilómetros han podido ser reconocidos en áreas determinadas de la superficie del globo. Lo que ocurre en capas más profundas del interior del planeta tan sólo puede ser deducido por medidas indirectas.

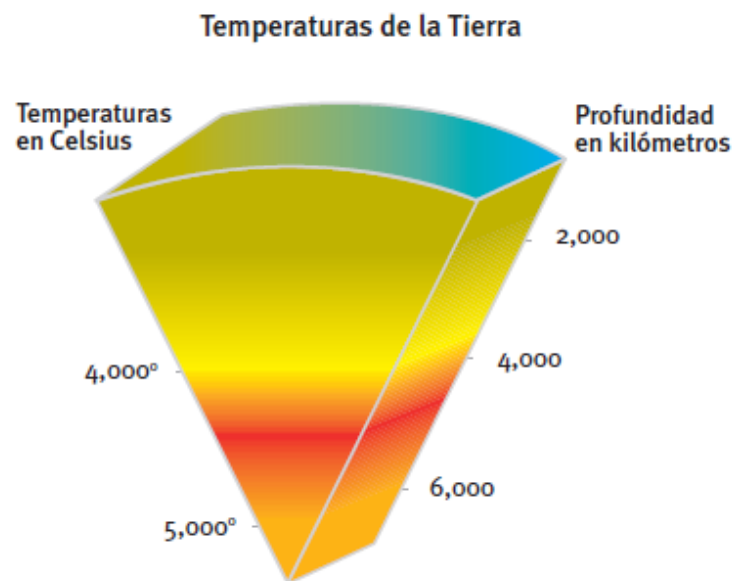


Figura N° 24: Temperaturas de la tierra
fuente: Manual de Geotermia-IDAE

¹⁵ (IDAE, Manual de Geotermia, 2007)

En la capa más externa del globo, la corteza se aprecia el incremento de temperatura que se experimenta al penetrar hacia las partes interiores de la misma debido al calor que la Tierra desprende hacia su exterior. Este incremento de la temperatura es lo que se conoce como gradiente geotérmico. El gradiente geotérmico observado es de: 2,5 °C - 3,0° C cada cien metros¹⁶.

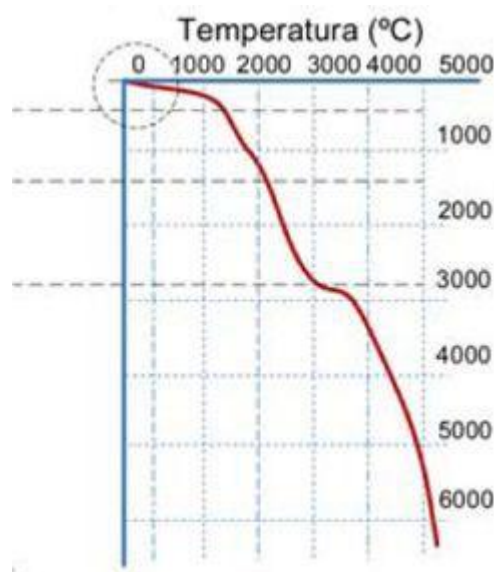


Figura N° 25: gradiente geotérmico

Fuente: (IDAE, Manual de Geotermia, 2007)

En áreas geológicamente activas, el valor del gradiente geotérmico puede ser muy superior a los 3°C/100 m, este fenómeno también se presenta en un sistema de fallas profundas, o debido a la existencia de acuíferos que pueden transportar el calor en sentido vertical. A este gradiente se lo denomina anómalo y surge en lugares idóneos para la extracción de calor con fines de generación de electricidad. El gradiente geotérmico también

¹⁶ (IDAE, Manual de Geotermia, 2007)

depende de las características físicas que presente el material en cada punto del interior del planeta (condiciones geológicas locales) como son: la relación presión con temperatura, composición química, presencia de movimientos conectivos y rozamientos, etc¹⁷.

Conductividad Térmica (K), para establecer la conductividad térmica con fines de generación geotérmica se toma las muestras de las rocas “in situ”, y en el laboratorio se las expone a un flujo de calor conocido. (Piedra Lara, 2011, pág. 32)

Flujo de calor (Q), se calcula como el producto del gradiente geotérmico por la conductividad térmica de las rocas, se lo mide perpendicularmente a la superficie de la tierra y representa la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie. (Piedra Lara, 2011, pág. 32)

$$Q = -K \cdot \frac{dT}{dz} = K \cdot G \dots (1)$$

Donde:

K: Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m} \cdot ^\circ C \right]$

G: Gradiente geotérmico $\left[\frac{^\circ C}{m} \right]$

Q: flujo de calor $\left[\frac{m \cdot W}{m^2} \right]$

¹⁷ (Piedra Lara, 2011)

2.2.11. Manifestaciones geotérmicas

La evidencia visual del calor interno de la Tierra la proporcionan fenómenos naturales como los volcanes, géiseres, fumarolas, manantiales de agua caliente y las pozas de lodo hirviente. (Cordova Zapata, 2007, pág. 11), tal como se muestra en la Figura N° 26



Figura N° 26: Fumarolas, laguna de aguas termales, volcán de fango

Fuente: (Cordova Zapata, 2007, pág. 11)

Las fuentes termales¹⁸ son emanaciones de agua, vapor de agua y mezcla de gases:

hidrógeno (H_2), metano (CH_4), sulfuro de hidrógeno (SH_2), anhídrido carbónico (CO_2), etc. a elevada temperatura.

¹⁸ (Sierra, 1998, pág. 11)

Los géiseres se forman en grietas o fisuras profundas, las que se llenan de agua freática, debido a las altas temperaturas existentes en profundidad entran en ebullición y son proyectadas violentamente hacia el exterior, este es un proceso intermitente, una vez expulsada el agua de la columna, ésta se llena nuevamente y se reinicia el ciclo. (Sierra, 1998, pág. 11)

Las fumarolas son emanaciones gaseosas que se producen en zonas cercanas a volcanes activos, a diferencia de las anteriores, su origen es volcánico, es mezcla de vapor de agua y gases tales como: ácido clorhídrico (ClH), anhídrido carbónico (CO₂) y compuestos sulfurados. Cuando predominan los compuestos sulfurados se denominan solfataras y producen importantes depósitos de azufre (S); en las cuales el mayor componente es el anhídrido carbónico (CO₂) se llaman mofetas. (Sierra, 1998, pág. 11)

Las presencias de vapor y gases de reservorio en superficie son un indicio de la posible existencia de un campo geotérmico, no obstante, existen campos geotérmicos en los que no hay manifestaciones termales en superficie. (Sierra, 1998, pág. 11)

2.2.12. Yacimiento geotérmico

Para realizar una explotación económica de esta energía es necesario contar con un medio que transporte la energía a la superficie, por esta razón el aprovechamiento de la energía geotérmica está ligado a la existencia de una anomalía geológica

llamada reservorio o yacimiento geotérmico, que consiste en una cámara de fluidos confinados a alta presión (litostática) y alta temperatura (Cardemil Iglesias, 2006).

Para que exista un reservorio geotérmico se deben dar condiciones especiales, las cuales a su vez definen los parámetros físicos del mismo, tales como presión, temperatura, permeabilidad, etc. La primera condición es la presencia de un volumen de magma en enfriamiento, que representa la fuente de calor del sistema. Debe existir también una capa rocosa de alta permeabilidad (acuífero), que almacene el fluido y permita su circulación, y por último, una capa impermeable llamada capa sello, que impida el escape de los fluidos a la superficie. Esta estructura es la que define a un reservorio geotérmico tal como se muestra en la Figura N° 27.

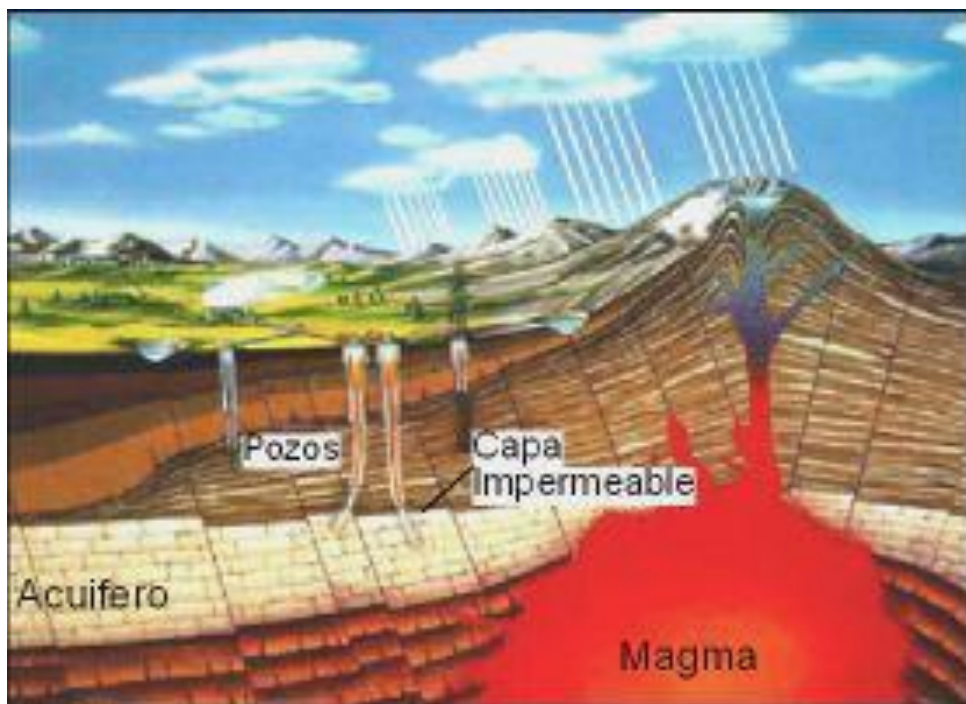


Figura N° 27: Reservorio Geotérmico

Fuente: (Cardemil Iglesias, 2006, pág. 4)

Estas condiciones no son fáciles de encontrar, al menos a una profundidad que permita una explotación económicamente rentable (1 a 5 Km.). Los lugares donde se pueden encontrar intrusiones magmáticas que entreguen calor, son principalmente en las zonas de subducción y en zonas de dorsales oceánicas. Así las zonas con potencial geotermal estimado son las que muestra en rojo la Figura N° 28, donde destaca el denominado cinturón de fuego del pacífico, Islandia e Italia, entre otros países¹⁹.

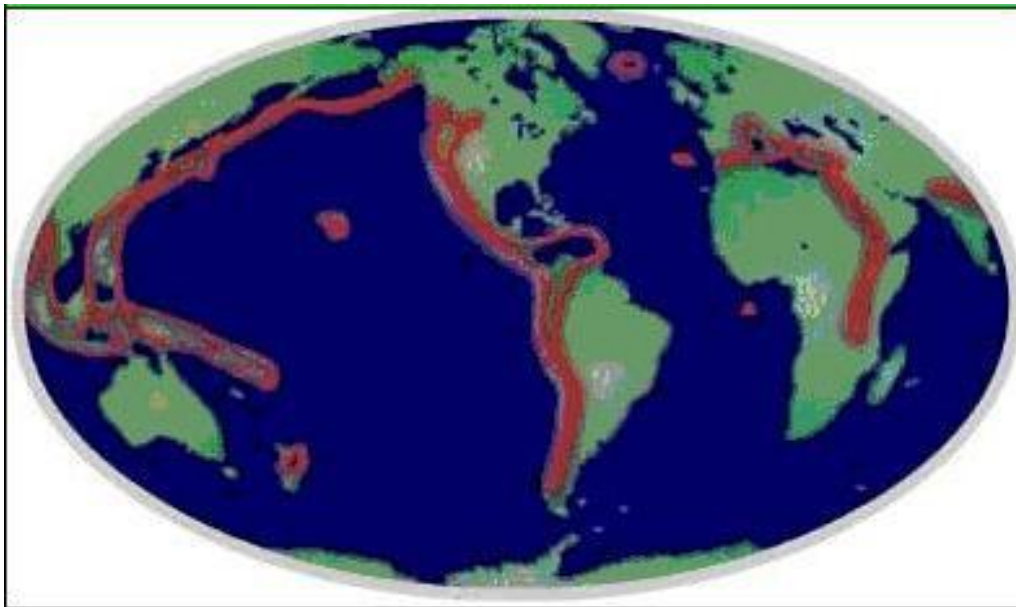


Figura N° 28: zonas Geotermales

Fuente: (Cardemil Iglesias, 2006, pág. 4)

¹⁹ (Cardemil Iglesias, 2006, pág. 4)

2.2.13. Estructura de un yacimiento geotérmico²⁰

Para que la energía geotérmica sea aprovechada es necesario que se acumule en un cuerpo del interior de la corteza, la forma más común de concentración es una unidad de agua que es calentada por una fuente de calor denominada magma y atrapada en rocas permeables y porosas bajo una capa de roca impermeable, esta unidad natural es la que se llama yacimiento, reservorio o sistema geotérmico. A continuación, se indica los factores básicos condicionantes para la presencia de este sistema:

Fuente de calor, corresponde al calor que fluye desde el núcleo del planeta hacia el exterior, generalmente este calor se da como una intrusión magmática a alta temperatura, emplazada en el manto a profundidades de 5-12 Km. A través de fracturas este magma, puede alcanzar la superficie como lava, pero por lo general permanece por debajo de la corteza terrestre transmitiendo calor a las rocas circundantes o depósitos de fluido acumulado. La temperatura de la masa magmática está entre 700-1200°C.

Fluido, constituye el agua contenida en el yacimiento, es de origen meteórico o superficial, aunque parte de ella puede ser magmática es decir vapor de agua producido por la evolución del magma. La recarga de agua debe tener la posibilidad de infiltrarse en el subsuelo, mantener el balance hidrológico y alcanzar la profundidad necesaria para ser calentada. Este fluido estará en fase líquida o vapor y a menudo

²⁰ (Piedra Lara, 2011)

contendrá sustancias químicas disueltas y gases tales como CO₂, H₂S, etc.

Reservorio, volumen suficiente de rocas permeables, porosas y fracturadas de tal manera que permitan no sólo contener una cantidad de fluido donde se almacene agua caliente o vapor (ver figura N° 29), sino la circulación convectiva del mismo, de tal forma que se asegure una explotación comercial.

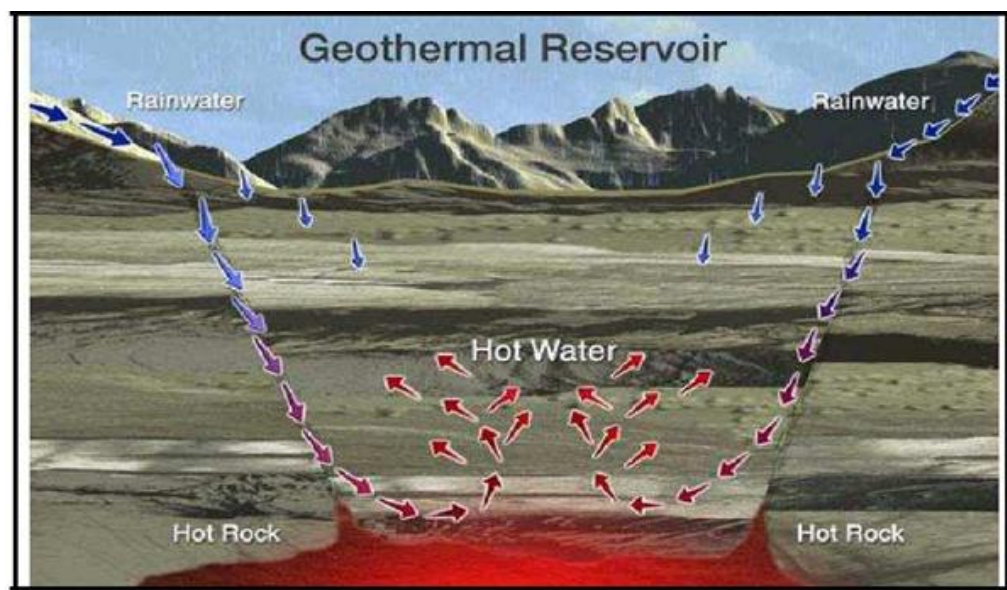


Figura N° 29: Esquema de un reservorio geotérmico

Fuente: (Piedra Lara, 2011, pág. 34)

2.2.14. Clasificación de los yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos se clasifican usualmente considerando el nivel energético de los fluidos en ellos contenidos y sus posibles formas de utilización. No existe una estandarización con respecto a los límites donde empieza y termina un recurso de alta, mediana, baja o muy baja

entalpía. Tomando en cuenta la clasificación propuesta por (Muffler y Cataldi, 1978) se tiene:

2.2.14.1. Yacimientos geotérmicos de alta entalpía

Su temperatura es superior a los 150°C. Formados por vapor seco o por una mezcla de agua y vapor, donde el foco de calor permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y temperatura elevadas, características termodinámicas que son fundamentalmente aprovechables para la producción de electricidad. Se localizan en zonas geográficas con elevados gradientes geotérmicos, a profundidades que oscilan entre los 1500-3000 metros. Los recursos de roca seca caliente es un caso que entra en este tipo de yacimiento. (Piedra Lara, 2011, pág. 35)

2.2.14.2. Yacimientos geotérmicos de media entalpía

Su temperatura se encuentra entre los 90 y 150 °C. Se sitúan a profundidades inferiores a 1000 metros, en zonas con un gradiente geotérmico elevado. Se aprovechan en centrales de generación eléctrica con ciclos binarios, a través de la utilización de un fluido intermedio de menor temperatura de vaporización. También pueden ser utilizados para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y en procesos industriales. (Piedra Lara, 2011, pág. 35)

2.2.14.3. Yacimientos geotérmicos de baja entalpía

Su temperatura se encuentra entre 30 y 90 °C. Se localizan en zonas con un gradiente geotérmico normal. Su utilización se basa en usos térmicos en sistemas de calefacción y climatización urbanos, y en diferentes procesos industriales. Los fluidos geotérmicos muy pocas veces son usados directamente, lo más común es el aprovechamiento de su energía mediante intercambiadores o bomba de calor. (Piedra Lara, 2011, pág. 36)

2.2.14.4. Yacimientos geotérmicos de muy baja entalpía

Energía almacenada en el terreno o en las aguas subterráneas a temperaturas menores a 30°C. Casi la totalidad de la superficie del planeta constituye un vasto yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja entalpía. Usos térmicos. Aporte energético a los sistemas de ventilación, calefacción, refrigeración de los locales y/o procesos, con o sin utilización de una bomba de calor. (Piedra Lara, 2011, pág. 36)

Tabla N° 4: Clasificación de los recursos geotérmicos en base a la temperatura

	<i>Muffler & Cataldi,</i> 1978	<i>Hochstein,</i> 1990	<i>Benderitter & Cormy,</i> 1990	<i>Haenel, Rybach & Stegena, 1988</i>
Baja entalpía	< 90C°	< 125C°	< 100C°	< 150C°
media entalpía	90-150°C	125-225°C	100-200°C	~Y
Alta entalpía	> 150°C	> 225°C	> 200°C	> 150°C

Fuente: (UPME, 2003, pág. 10)

2.2.15. Tipos de plantas geotérmicas

2.2.15.1. Pantas tipo vapor directo²¹

Las plantas de este tipo también se denominan (Vapor seco) usan reservas de vapor seco, el cual puede ser saturado o sobrecalentado, el cual lleva cierta cantidad de gases no condensables de composición y concentración variable.

El vapor es llevado de varios pozos a través de una tubería a la casa de máquinas donde es usado directamente en turbinas tipo impulso/reacción. Entre la boca del yacimiento y la planta existen separadores centrífugos situados cerca del yacimiento para remover partículas tales como polvo y sólidos tales como pedazos de la piedra; a lo largo de la tubería se instalan

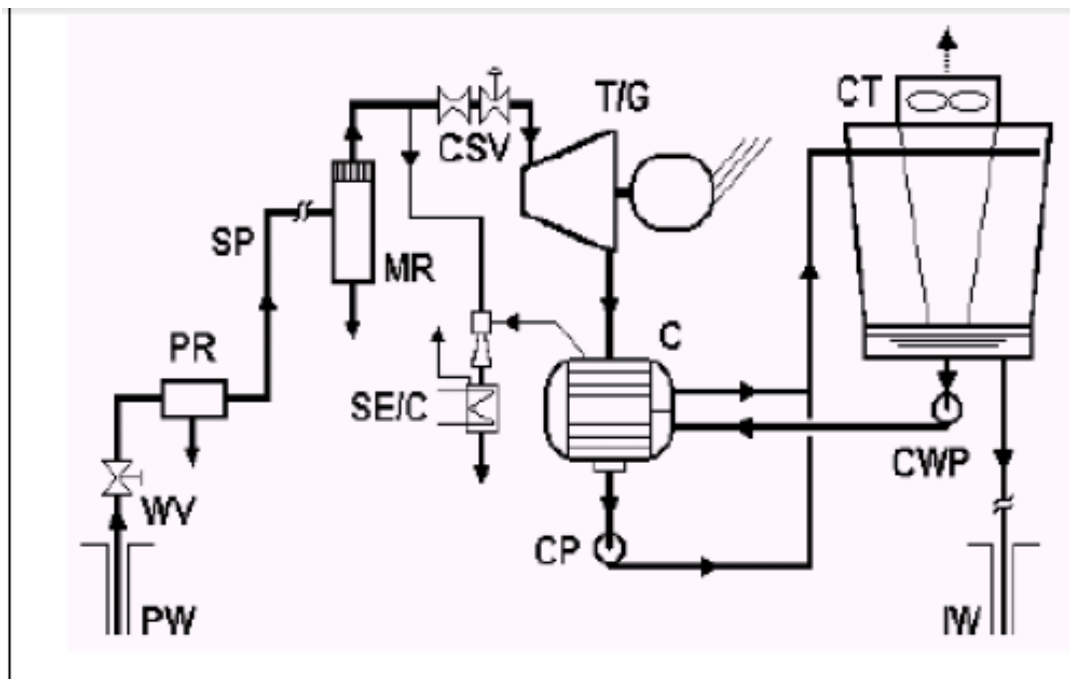
²¹ (UPME, 2003)

puntos de drenaje para remover la condensación de vapor que se forma durante la transmisión, y así remover la humedad a la entrada de la casa de máquinas.

La Figura N° 30, muestra un diagrama simplificado de las plantas tipo Direct-Steam. En el vapor geotérmico se encuentran gases no condensables (NCG), usualmente entre 2 al 10 %, lo cual hace que sea necesario un sistema de extracción de gas, (componente crítico de la planta).

Usualmente, se utilizan eyectores de dos etapas, con condensadores tanto dentro como al final de los mismos, sin embargo, en algunos casos es necesario colocar bombas de vacío o turbo compresores.

Un condensador tipo superficie se presenta. En la Figura N° 30, pero se usan a menudo los condensadores de contacto directo; el anterior se prefiere siempre que el vapor de NCG deba tratarse o debe procesarse antes de descargarlo a la atmósfera por ejemplo siempre exista la posibilidad que los límites para el ácido sulfhídrico sean excedidos, en tales casos una planta de química puede ser instalada para remover dicho compuesto, sin embargo, para una planta pequeña no es económicamente viable.



CONVENCIONES							
CP	Bomba de condensado	C	Condensador	SE/C	Eyector / condensador vapor	PW	Pozos de producción
CSV	Válvulas de control y parada	CT	Torre de enfriamiento	SP	Tubería de Vapor	PR	Reductor de presión
IW	Pozos de Inyección	CWP	Bomba para agua de refrigeración	T/G	Turbina / generador	WV	Válvulas de Cabeza de pozo
MR	Removedor de humedad						

Figura N° 30: Diagrama simplificado de una planta geotérmica de tipo vapor directo

Fuente: (UPME, 2003, pág. 33)

Como se observa en la Figura N° 30, el sistema incluye un condensador de refrigeración. El vapor condensado no recircula a la caldera, tal como en una planta de generación convencional, este se utiliza para alimentar la torre de enfriamiento, el exceso de condensado típicamente de 10-20 % de peso del

vapor, es usualmente reinyectado al yacimiento. A largo plazo la producción puede agotar las reservas y se están explorando técnicas para aumentar la cantidad de fluido reinyectado. El uso los condensadores de aire permitirían el 100 % retorno, pero hasta ahora han sido antieconómicos. Las torres de enfriamiento de tiro mecánico, ya sea de flujo continuo o cruzado son las más usadas para sistemas de enfriamiento tipo húmedo, sin embargo, en algunas plantas se utilizan las torres de tiro natural.

En la actualidad las plantas tienen unos rangos de 20 a 60 MW por unidad, dichas unidades tienen un diseño modular para rápida instalación, el diseño flexible permite adaptarse a un amplio rango de condiciones de vapor.

2.2.15.2. Pantas tipo “flash steam”²²

Los yacimientos de vapor seco, son poco frecuentes. Los más conocidos son aquellos donde predomina la fase líquida. En pozos artesianos, el fluido producido es una mezcla de las dos fases, líquido y vapor. La calidad de la mezcla (por ejemplo, porcentaje de vapor) es función de las condiciones del fluido en el yacimiento, las dimensiones del pozo, y la presión en la cabeza del pozo, la cual se controla mediante una válvula o por medio de una placa de orificio.

A pesar de que algunas máquinas experimentales han generado energía impulsadas por un fluido que cuenta con las dos fases (líquido y vapor), convencionalmente se separan las fases y solo se usa el vapor para impulsar la turbina debido a su presión en la cabeza del pozo es baja, típicamente entre 0,5-1 MPa la fase líquida y la gaseosa difieren

²² (UPME, 2003)

significativamente en la densidad ($\rho_f/\rho_g=175-350$) permitiendo una separación efectiva por la acción centrífuga. Los separadores centrífugos producen vapor con calidades superiores al 99,99 %.

El líquido proveniente del separador puede ser reinyectado, usado para producir energía térmica por medio de intercambiadores de calor para gran variedad de aplicaciones directas, o aplicaciones de baja presión inmediatas mediante la válvula de control o la placa de orificio.

Las plantas en las que se utiliza vapor a alta presión para generar energía son las llamadas single flash y las que usan tanto el vapor a alta y a baja presión son denominadas Double – Flash

2.2.15.2 Pantas tipo “single flash”²³

El fluido con las dos fases proveniente del pozo es dirigido horizontal y tangencialmente en el separador ciclónico (ver figura N° 31). El líquido tiende a fluir en forma circular por las paredes, mientras que el vapor sube y es removido por un tubo vertical. El diseño es muy simple ya que no tiene partes móviles y es conocido como separador de salida en el fondo. En ocasiones se utilizan baffles para mejorar la segregación de las dos fases, una válvula de bola provee seguridad ante la presencia de impurezas del líquido que pueda entrar en la línea de vapor. Las líneas de transmisión de vapor son esencialmente las mismas que las usadas en las plantas tipo Dry- Steam. (UPME, 2003)

El balance de la planta es también es prácticamente idéntico a las plantas tipo direct-steam, la principal diferencia es la cantidad de líquido que debe

²³ (UPME, 2003)

ser manejado. Comparando plantas de 55 MW, una planta típica Single-Flash produce cerca de 630 Kg/s de líquido sobrante, mientras que una planta Direct-Steam produce 20 Kg/s, una relación de 30 a 1, si todo este líquido es reinyecto la planta Single –Flash podrá retornar al yacimiento cerca del 85 % de la masa producida, en comparación del 15 % de la planta tipo Direct- Steam. (UPME, 2003)

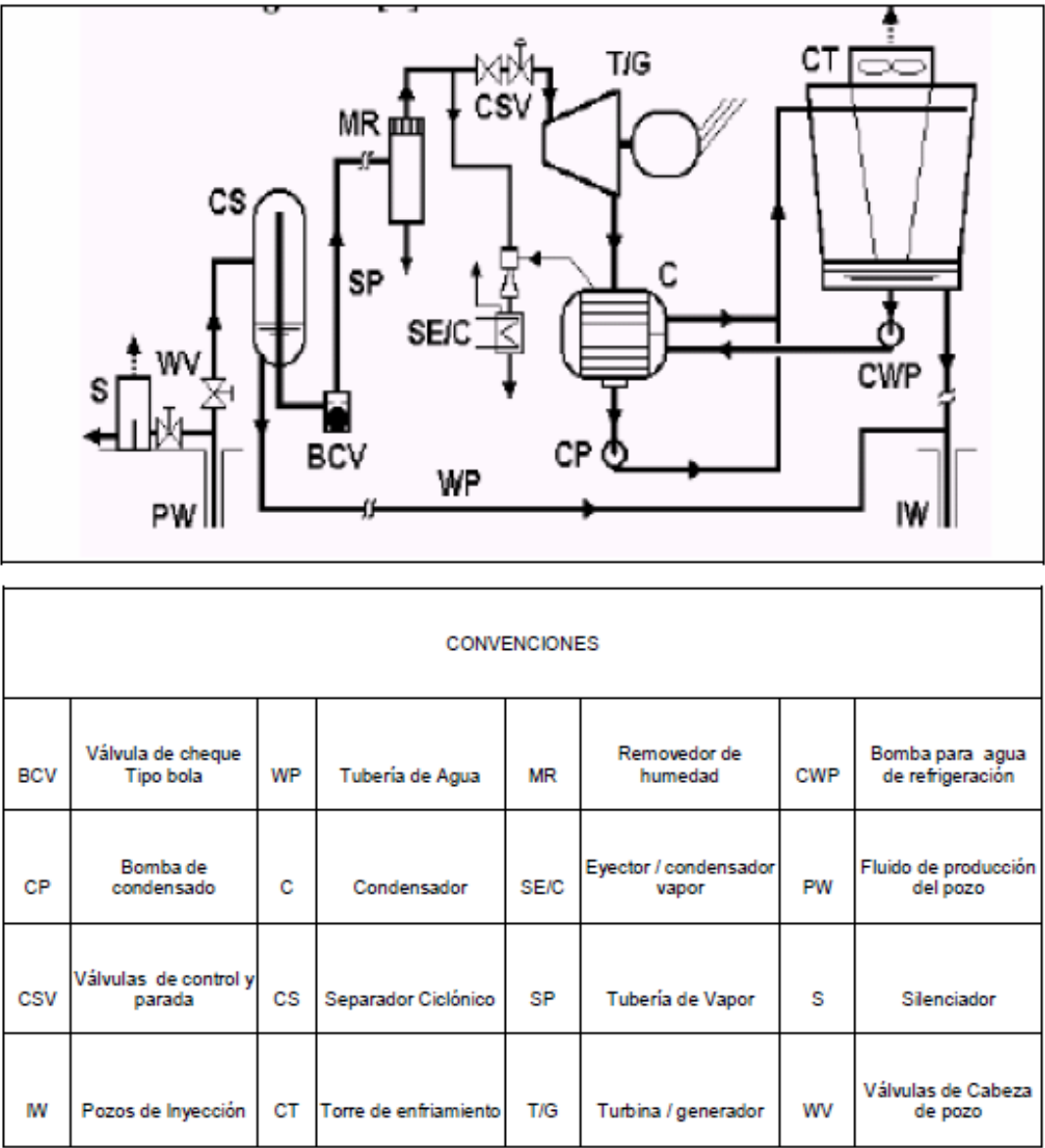


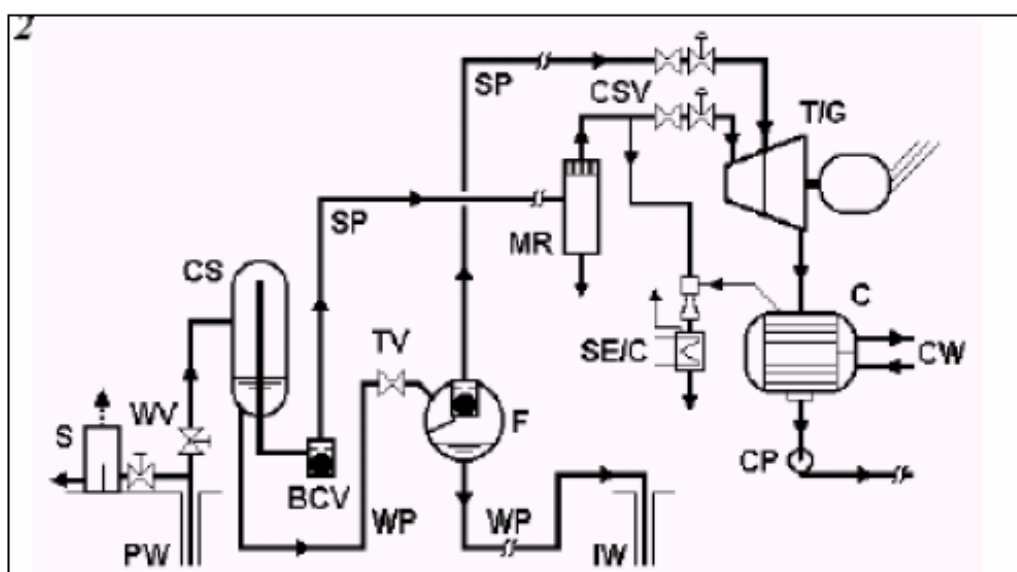
Figura N° 31: Diagrama de planta geotérmica single flash

Fuente: (UPME, 2003, pág. 35)

2.2.15.3. Pantas tipo “Double flash Plantas”²⁴

Mediante esta tecnología se puede obtener entre un 20 a un 25 % de potencia adicional a partir del mismo fluido geotérmico. El vapor de baja presión producido al estrangular el líquido a baja presión es enviado a una turbina de baja presión o a una etapa adecuada de la turbina principal (en el caso de una turbina de admisión dual). El principio de operación de este tipo de planta es similar a la planta tipo Single Flash, sin embargo, es mucho más costosa debido a que requiere mayor equipamiento. En la figura N° 32 se puede observar este tipo de planta.

²⁴ (UPME, 2003)



CONVENCIONES											
BCV	Válvula de cheque Tipo bola	WP	Tubería de Agua	IW	Pozos de Inyección	F	"Flasher"	SP	Tubería de Vapor	SH	Sobrecalentador
CP	Bomba de condensado	C	Condensador	MR	Removedor de humedad	PW	Fluido de producción del pozo	E	Evaporador	S	Silenciador
CSV	Válvulas de control y parada	CS	Separador Ciclónico	T/G	Turbina / generador	TV	Válvula Reguladora	CW	Agua de refrigeración	WV	Válvulas de Cabeza de pozo
SE/C	Eyector / condensador vapor										

Figura N° 32: Diagrama de planta geotérmica Double flash

Fuente: (UPME, 2003, pág. 36)

2.2.15.4. Plantas geotérmicas tipo Binario (Binary plants)

Permiten extraer energía de yacimientos de media temperatura (entre 100 y 150 °C) y de recursos geotérmicos con elevada salinidad de forma más eficiente que las plantas flash, provocando un menor impacto ambiental al no emitir gases a la atmósfera. Se basan en evitar el uso directo del fluido termal, utilizando un fluido secundario. Cuando el fluido geotérmico tiene suficiente entalpía (> 200

kcal/kg), se puede utilizar agua como fluido secundario, pero si tiene menor entalpía (yacimientos de media temperatura), se usa como fluido secundario alguno con un comportamiento termodinámico mejor (bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a altas temperaturas). En este caso, es común el empleo de mezclas de hidrocarburos altamente volátiles como propano, n-butano, isobutano o isopentano. (IDAE, 2011)

Los desarrollos tecnológicos durante la década de los ochenta y noventa, han supuesto notables avances en la producción de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos de temperaturas más bajas, de modo que, en la actualidad, estas plantas pueden utilizar recursos de temperaturas de 75 °C y recursos de temperaturas hasta 180 °C. A través de un intercambiador de calor, el fluido termal que puede ser agua caliente, vapor o una mezcla de ambos ceden el calor al fluido secundario (o *de trabajo*), que se calienta y vaporiza. (IDAE, 2011)

El vapor resultante acciona la turbina y, posteriormente, se condensa en un condensador de aire o agua y se bombea de nuevo al intercambiador, donde vuelve a vaporizarse. El fluido secundario, por tanto, se encuentra en un circuito cerrado. El esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario se recoge en la Figura 33.

Los fluidos geotérmicos nunca entran en contacto con la atmósfera antes de ser bombeados de nuevo al yacimiento geotérmico. Por otra parte, el agua geotermal nunca se vaporiza en las plantas de ciclo binario con sistema de refrigeración por aire, de modo que el 100 % de la misma puede reinyectarse al almacén a través de un circuito cerrado, circunstancia que, además de contribuir a reducir prácticamente a cero las ya de por sí bajas emisiones, permite mantener la

presión del almacén, prolongando de este modo el tiempo de duración del proyecto. (IDAE, 2011)

La generación de energía eléctrica a partir de recursos de baja entalpía (hasta 180 °C) solo es económicamente viable en plantas binarias que siguen el proceso *Orgánico Rankine* (ORC: *Organic Rankine Cycle*) o el proceso *Kalina*. El desarrollo de estos ciclos ha permitido superar las dificultades de costes y rendimientos que presentaban hace años las plantas binarias, posibilitando, incluso, el aprovechamiento de recursos procedentes de yacimientos de rocas calientes (HDR/EGS) para generar electricidad²⁵.

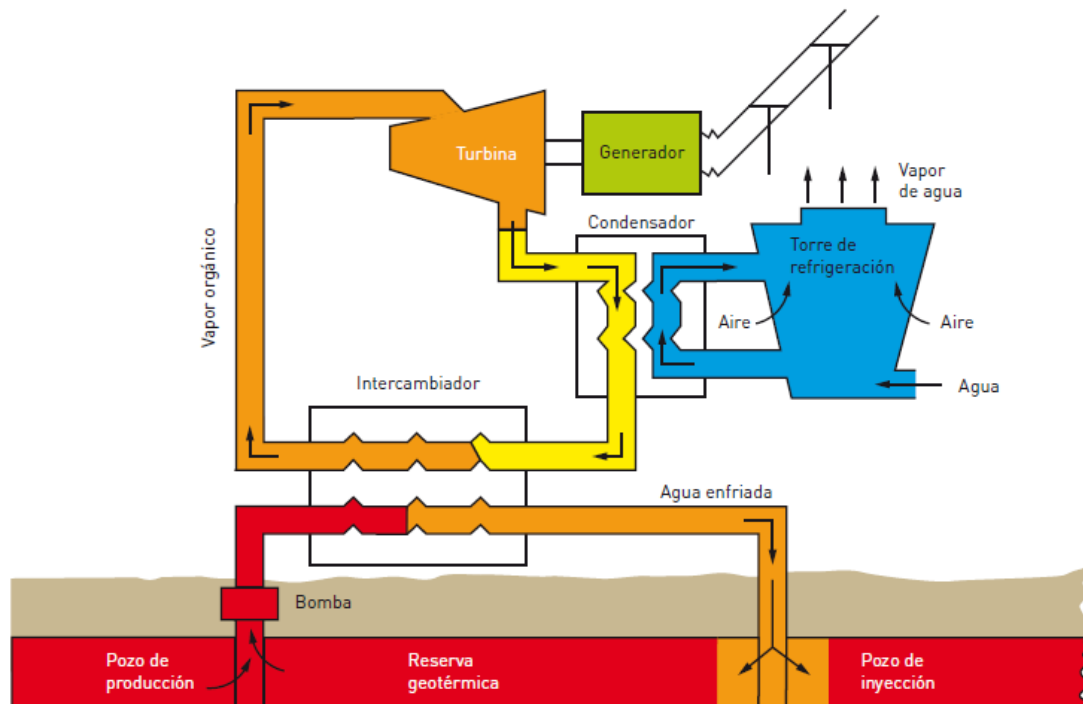


Figura N° 33: Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario

Fuente: (IDAE, 2011, pág. 47)

²⁵ (IDAE, Evaluación del potencial de energía termica, 2011)

Ciclo Rankine Orgánico (ORC)²⁶

El sistema de producción eléctrica basado en el ciclo Orgánico Rankine es un sistema de ciclo binario avanzado, completamente cerrado, basado en un simple proceso de evaporación. Las plantas eléctricas de ciclo binario que operan con este ciclo tienen un extenso campo de aplicación con recursos de temperaturas superiores a 120°C. También pueden utilizarse en ellas recursos de temperaturas más bajas como sucede en la central geotérmica ORC de Simbach-Braunau (Austria), que usa salmueras a 80 °C para producir energía eléctrica, pero con costes más altos y eficacias más bajas en la conversión de calor a electricidad. (IDAE, 2011)

Las plantas eléctricas ORC utilizan como fluido secundario uno de naturaleza orgánica (normalmente, un hidrocarburo, como propano, butano o isopentano), cuya selección depende, fundamentalmente, de la temperatura de la salmuera geotérmica. El ciclo de Rankine incluye cuatro procesos que cambian el estado del fluido secundario, en los que intervienen, como dispositivos principales, un evaporador, una turbina, una torre de refrigeración y una bomba de alimentación (ver Figura 34). Ejemplos de aplicaciones en proyectos geotérmicos son las centrales eléctricas de Landau (Alemania) y Soultz-sous-Forêts (Francia). (IDAE, 2011)

La eficiencia en la conversión de energía bruta de una central eléctrica ORC es función de la temperatura inicial de la salmuera geotérmica, aumentando desde un 5,5 % a 80 °C hasta un 12 % a una temperatura de 180 °C.

²⁶ (IDAE, Evaluación del potencial de energía térmica, 2011)

El principal inconveniente del ciclo Orgánico Rankine es su limitada capacidad de adaptación a posibles cambios en las variables que condicionan el proceso. Parámetros de control como la temperatura, a veces solo se conocen cuando finaliza la perforación y se completa la fase de pruebas, dificultando el diseño previo de las plantas geotérmicas. (IDAE, 2011)

No obstante, el proceso ORC constituye una tecnología probada y fiable. El principal proveedor de plantas de este tipo, la compañía *Ormat Systems Ltd.*, ha comprobado su éxito con una potencia instalada de 1200 MW en yacimientos de baja y alta entalpía de todo el mundo (Legmann 2009).

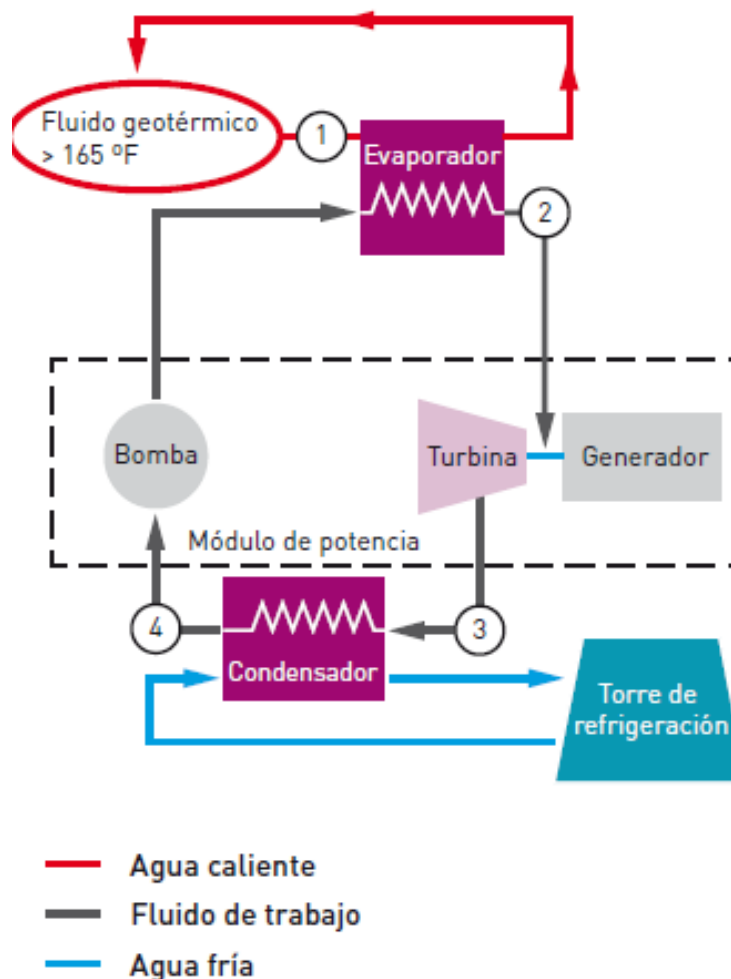


Figura N° 34: Esquema del ciclo orgánico Rankine

Fuente: (IDAE, 2011, pág. 48)

ha construido plantas modulares de ciclo binario Rankine, utilizando una unidad de generación eléctrica de diseño propio, comercializada como **Ormat® Energy Converter** (OEC). La potencia de las unidades producidas varía desde 250 kW hasta 130 MW. Las OEC están diseñadas para instalaciones al aire libre que trabajan con una amplia variedad de fuentes de calor, incluidos los recursos de baja temperatura. Cabe citar como ejemplo una de las unidades pequeñas de *Ormat* instalada en Tailandia, que utiliza fluidos geotérmicos a unos 49 °C. Los componentes principales de una unidad OEC son un vaporizador/precalentador, un turbogenerador, un condensador con sistema de enfriamiento por aire o por agua, una bomba de alimentación y dispositivos de control. (IDAE, 2011)

Se trata de un producto comercial suficientemente desarrollado, probado en campo, utilizado en 71 países de todo el mundo. (IDAE, 2011)

Ciclo Kalina. Utiliza un fluido secundario con, al menos, dos componentes químicos (normalmente amoníaco y agua, actuando esta última como disolvente). La proporción de los componentes varía para permitir el cambio de fase a unas determinadas condiciones de presión y temperatura. . (IDAE, 2011)

Esto supone una mayor adaptabilidad a variaciones de temperatura de la salmuera geotérmica. . (IDAE, 2011)

De modo similar a como sucede en el ciclo Orgánico Rankine, la energía térmica se transmite a un fluido secundario. Como consecuencia de los diferentes puntos de ebullición, se genera un vapor rico en amoníaco y un agua pobre en este compuesto. . (IDAE, 2011)

La eficiencia en la conversión de energía bruta de una central eléctrica de ciclo Kalina depende, igualmente, de la temperatura inicial de la salmuera geotérmica,

aumentando desde el 8,5 % a 80 °C hasta el 12 % a una temperatura de 160 °C, superando, de este modo, la eficiencia de las plantas ORC, especialmente a bajas temperaturas. Este hecho, junto a su mayor flexibilidad, constituye la principal ventaja de la tecnología Kalina, relativamente reciente, frente a la tecnología ORC. (IDAE, 2011)

Ejemplos de aplicaciones geotérmicas de la tecnología Kalina son las centrales eléctricas de Husavik, en Islandia, y Unterhaching, en Alemania.

Tabla N° 5: Equipo principal de plantas geotérmicas

Equipo	tipo de sistema			
	Dry steam	Single flash	Double Flash	Basic Binary
suministro vapor o calmuera				
Bombas	no	No (Pos)	No (Pos)	si
válvulas cabeza de pozo	si	Si	si	si
Silenciadores	si	Si	si	no
Desarenadoras	si	No	No	si
Tubería de vapor	si	Si	si	no
separadores ciclón de vapor	no	Si	si	no
tanques de almacenamiento	no	No	si	no
Tubería salmuera	no	Si	si	si
bomba auxiliar	no	Pos.	Pos.	Pos.
separador final humedad	si	Si	si	no
Intercambiador de Calor				
Evaporadores	no	No	No	si
Condensadores	si (no)	si (no)	si	si
Turbina-Generador y controles				
Turbina de vapor	si	Si	si	no
Turbina de vapor orgánica	no	No	no	si
Turbina de admisión dual	no	No	si	no
Sistema de control	si	Si	si	si
Bombas				
Condensador	si (No)	si (No)	si	si
Agua refrigeración	si (No)	si (No)	si	si
inyección salmuera	No	No (Pos)	si (no)	si
Sistema remoción gas no condensable				

Fuente: (UPME, 2003, pág. 38)

2.3 Definición conceptual de la terminología empleada.

Energía Geotérmica: Energía renovable no convencional que aprovecha el calor del subsuelo para la generación de energía eléctrica.

Ciclo Rankine: ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo mediante turbinas a vapor y como fluido de trabajo al agua.

Ciclo Rankine Orgánico o ciclo binario: ciclo termodinámico de vapor que utiliza un fluido orgánico de alta masa molecular con un cambio de fase líquido vapor o punto de ebullición que tiene lugar a temperaturas más bajas que el cambio de fase de agua a vapor.

Subducción: proceso por el que una placa litosférica oceánica se hunde bajo otra placa, ya sea oceánica o continental.

Entalpia: es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Vulcanismo: Se produce cuando el material fundido en el interior de la tierra sale a la superficie a través de grietas, fisuras u orificios. A este material que sale se le denomina lava. Se caracteriza porque se enfría rápidamente y libera sus gases disueltos.

Geoquímica. La geoquímica es la ciencia que tiene por objeto el reconocimiento de la distribución de los elementos químicos en la tierra, estudia las reacciones químicas que ocurren en la superficie terrestre y en

su interior, leyes que gobiernan la distribución de elementos químicos y sus isótopos en la tierra.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

En el presente trabajo de tesis es importante describir los criterios de investigación que nos permitió desarrollar y concluir con éxito el proyecto, los cuales son los siguientes.

a) Investigación Aplicada: Porque se hará uso de los conocimientos y bases teóricas de la ingeniería para el dimensionamiento de la central geotérmica

b) Investigación Descriptiva: Porque describe la situación actual en el yacimiento geotérmico Jesús María en base a sus parámetros de temperatura, presión, Ph, etc, tal como se presentan en la realidad.

3.2. Población y muestra

La presente Tesis ha sido aplicado a un lugar específico, donde la población es la misma que la muestra y es el pozo geotérmico de media entalpía, del yacimiento geotérmico Jesús María en Moquegua.

3.3. Hipótesis

Con el dimensionamiento y Selección de una central geotérmica binaria basada en el ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico) aprovecharemos la energía del pozo geotérmico de media entalpía, del yacimiento geotérmico Jesús María en Moquegua.

3.4. Variables - Operacionalización

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES
Central geotérmica binaria basado en el ciclo Rankine Orgánico	Permiten extraer energía de yacimientos de media temperatura (entre 100 y 150 °C) y de recursos geotérmicos con elevada salinidad de forma más eficiente que las plantas flash, provocando un menor impacto ambiental al no emitir gases a la atmósfera. (Piedra Lara, 2011, pág. 35)	Equipos necesarios para obtener la transformación de energía geotérmica en eléctrica	<p>Dimensionamiento del evaporador.</p> <p>Dimensionamiento de la turbina.</p> <p>-Turbina</p> <p>-Tuberías</p> <p>-Bombas</p> <p>-Condensador</p> <p>-Fluido de trabajo</p>
Yacimiento geotérmico de media entalpia	Yacimiento cuya temperatura se encuentra entre los 90 y 150 °C. Se sitúan a profundidades inferiores a 1000 metros, en zonas con un gradiente geotérmico elevado. Se aprovechan en centrales de generación eléctrica con ciclos binarios, a través de la utilización de un fluido intermedio de menor temperatura de vaporización. (Piedra Lara, 2011, pág. 36)	Determinar los parámetros característicos del yacimiento	<p>Temperatura(°C)</p> <p>Potencial de energía geotérmica</p>
		Determinar el potencial de energía	

Tabla N° 6: Variables - Operacionalización

3.5. Métodos y Técnicas de investigación

Técnicas

Observación

Este tipo de técnica nos permitirá realizar una inspección visual de la situación actual en lo referente al yacimiento geotérmico, observar y tomar nota de las manifestaciones y de hacerse una idea sobre la distribución de los equipos de la planta geotérmica, etc. esta información es muy importante para realizar la propuesta de acuerdo al estudio realizado.

La observación²⁷ desempeña un papel importante en la investigación, es un elemento fundamental de la ciencia. El investigador durante las diversas etapas de su trabajo, al utilizar sus sentidos: oído, vista, olfato, tacto y gusto, acumula hechos que le ayudan a identificar un problema. Mediante la observación descubre pautas para elaborar una solución teórica de su problema. ¿Para qué se observa? La respuesta a esta pregunta permite distinguir funciones esenciales que pueden ser prioritarias a la hora de crear o de utilizar un instrumento de observación.

Análisis de documentos

Para desarrollar esta técnica buscaremos la información en libros actualizados con relación al tema de investigación, también analizar los diferentes trabajos realizados en revistas, manuales, fichas técnicas, publicaciones en distintas páginas confiables de internet.

²⁷ <http://manuelgalan.blogspot.com/2013/02/la-observacion-como-metodo-de> 21.html

3.6. Descripción de los instrumentos utilizados

Tabla N° 7: Técnicas e instrumentos de investigación

Técnicas	Instrumentos	Instrumento de Registro
Observación	Guía de observación y/o Escala de observación	Papel, lápiz, cámara fotográfica y de video
Análisis de documentos	Libros, revistas, tesis, manuales, fichas técnicas, publicaciones en internet	Ficha de registro

Fuente: elaboración propia

3.7. Análisis Estadístico e interpretación de los datos

Fase de recopilación de datos.

Se inicia con el procesamiento y recolección de toda la información bibliográfica que se refiere a la zona de estudio, se empleó informes internos y externos, elaboración de planos geológicos, consideración de estudios regionales cercanos a la zona.

Fase de campo.

Consistió en el reconocimiento del área de estudio. Identificación y registro de fuentes termales de estudio.

Base de datos.

Los datos de coordenadas de las fuentes termales, temperatura, pH, resultados de laboratorio por ICP y análisis de agua, son almacenados en la base de datos del software Microsoft Excel.

Análisis de datos.

Los datos de laboratorio son puestos a prueba de geotermómetro de sílice vs entalpia, para la determinación del tipo de yacimiento geotérmico a la cual pertenecen.

Esta es una de las etapas más importantes en la investigación, porque aquí es donde se proyecta a las conclusiones.

CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Propuesta de la investigación

En el presente trabajo de tesis, se dará mayor impulso al uso de los recursos energéticos renovables, en especial al recurso geotérmico de media entalpía mediante un estudio de potencial, las características individuales tales como la regularidad de temperatura y la aplicabilidad de determinada tecnología para la turbina de acuerdo al fluido orgánico seleccionado a ser instalados en el yacimiento geotérmico para abastecer la demanda creciente y la demanda no cubierta del sector.

La planta escogida está basada en ciclo binario ya que esta tecnología se amolda a recursos geotérmicos de media entalpía. Se basa en el uso directo de un fluido secundario en vez del fluido termal, el fluido secundario normalmente es de composición orgánica que se comporta mejor termodinámicamente, es decir tiene un punto de ebullición más bajo y altas presiones de vapor a bajas temperaturas. El fluido geotermal sede calor al fluido secundario mediante un intercambiador de calor, y este fluido es calentado y vaporizado, el vapor acciona la turbina y posteriormente es enfriado y condensado. Se grafica en la siguiente figura N° 35

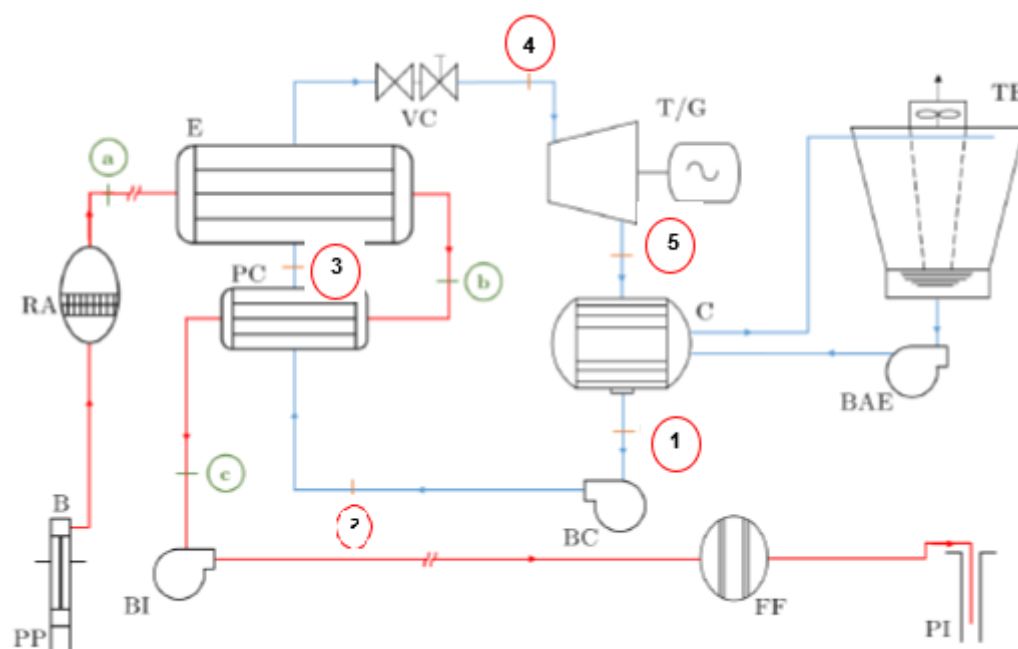


Figura N° 35: Planta geotérmica binaria propuesta

Fuente: (Matamala Aviles, 2014, pág. 42)

CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Diseño de la planta

El diseño consiste en el cálculo del ciclo termodinámico para luego realizar la selección de los componentes de la planta geotérmica con ciclo binario. Se eligió este tipo de planta debido a que las características del recurso geotérmico son las adecuadas para un uso más efectivo.

La planta con ciclo binario (o ciclo Rankine Orgánico) utiliza el fluido geotermal para ceder calor al fluido secundario mediante un intercambiador de calor, y este fluido es calentado y vaporizado, dicho vapor acciona la turbina para posteriormente ser enfriado y condensado. La tabla 8 muestra los componentes de una planta de ciclo binario.

Tabla N° 8: Componentes de una planta de ciclo binario

SISTEMA	SUBSISTEMAS	COMPONENTES
Planta Geotérmica binaria	Suministro del fluido geotérmico	Bombas centrífugas multietapa con eje lineal accionado por motores montados en la superficie, o bombas sumergibles, tuberías y sistema de remoción de arena
	Sistema de alimentación de fluido de trabajo	Bomba y tuberías
	Calentamiento del fluido de trabajo	Pre-calentador y evaporador
	Generación Eléctrica	Turbina, generador, válvula de control y accesorios
	Condensación del fluido de trabajo	Condensador, bomba de condensado, torre de enfriamiento, bomba de agua de refrigeración, tuberías, bombas de evacuación de fluido de trabajo durante mantenimiento

Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

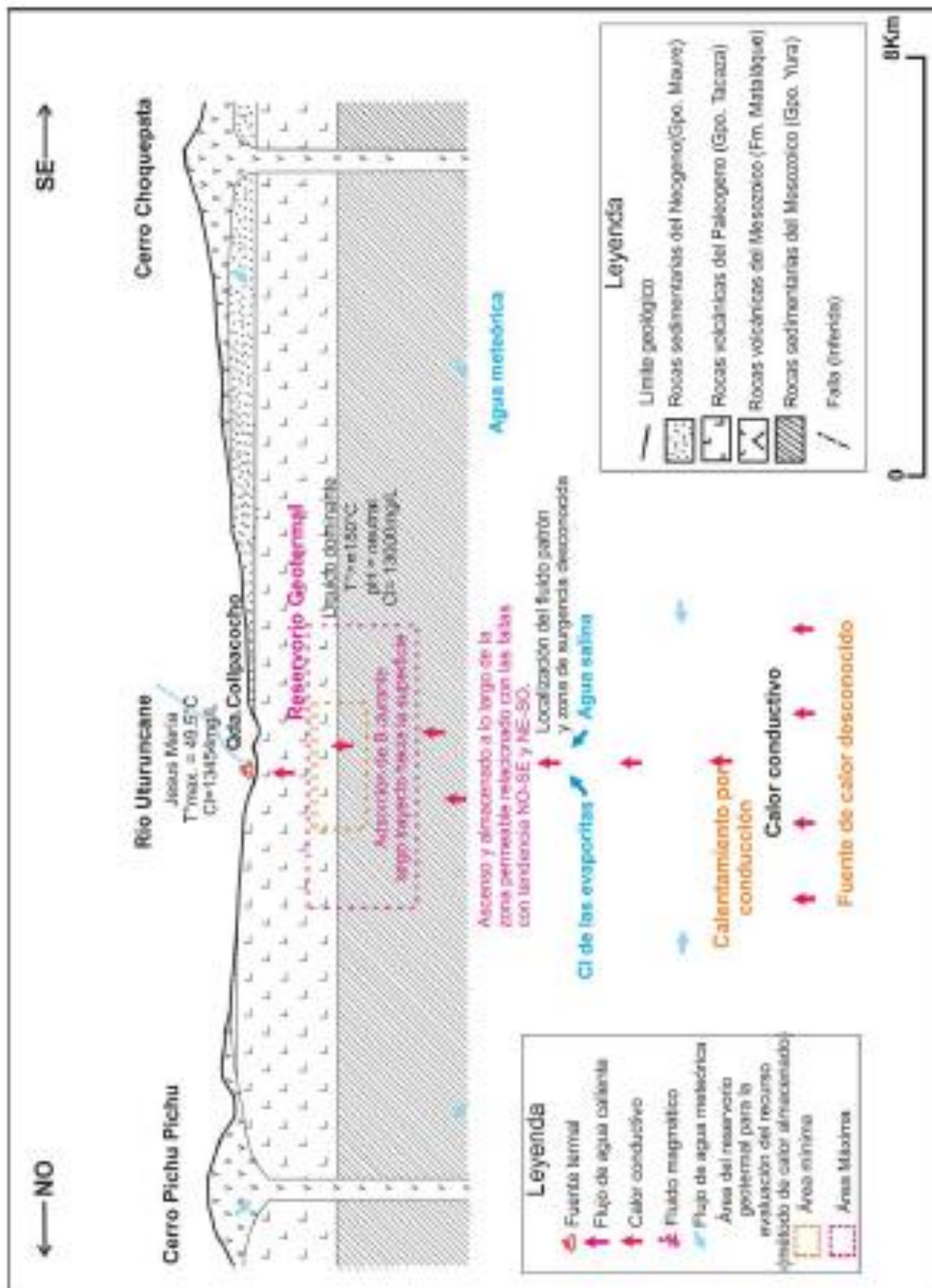


Figura N° 36: Modelo conceptual de la circulación de fluidos de la zona geotermal "Jesús María"

Fuente: (INGEMMET, 2014, pág. 56)

$$\dot{m}_{FG} (h_a - h_c) = \dot{m}_{FT} (h_4 - h_2) \dots (2)$$

\dot{m}_{FG} = flujo másico del fluido geotérmico

\dot{m}_{FT} = flujo másico del fluido de trabajo

Se puede asumir que el fluido geotermal es de composición similar al agua, en tal caso la ecuación sería:

$$\dot{m}_{FG} \cdot \overline{c}_{FG} (T_a - T_c) = \dot{m}_{FT} (h_4 - h_2) \dots (3)$$

\overline{c}_{FG} = calor específico del fluido geotérmico

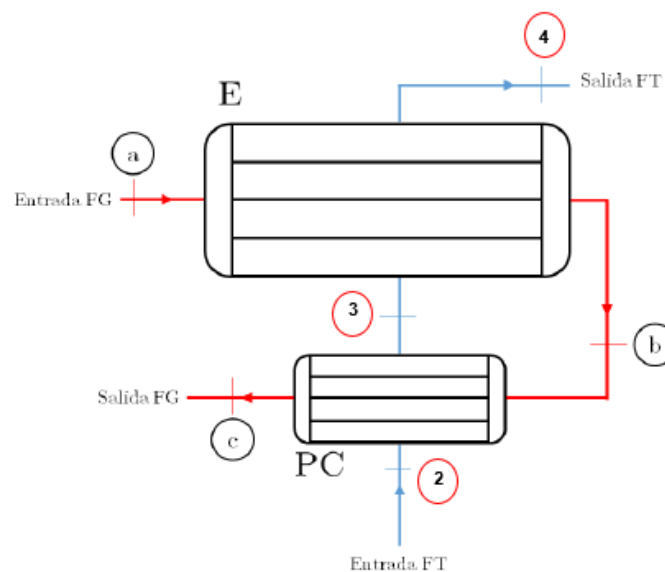
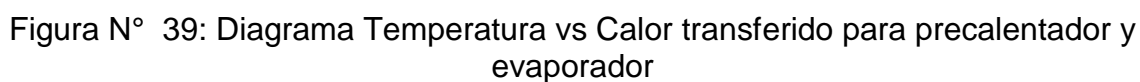


Figura N° 38: Evaporador y precalentador

Fuente: (Matamala Aviles, 2014, pág. 45)

El fluido de trabajo llega a su punto de evaporación gracias al precalentador y está representado en el estado 3. El proceso de evaporación del fluido de trabajo ocurre gracias al evaporador y por tratarse de un cambio de fase se representa por la isoterma 3-4. Existe un punto dentro del proceso de intercambio, donde el fluido de trabajo y el geo-fluido presentan la menor diferencia de temperatura, este se denomina pinch point, cuyo valor se representa por ΔT_{pp} .



Para obtener los estados 2,3 y 4 se debe conocer las especificaciones del ciclo, es decir, el estado 2 corresponde al líquido que sale de la bomba posterior al condensador, el estado 3 corresponde al líquido saturado a la presión de evaporación, antes de ingresar al evaporador, y el estado 4 corresponde al vapor

saturado antes de ingresar a la turbina. Con este conocimiento, se deducen las ecuaciones de cada intercambiador de calor por separado:

Evaporador:

$$\dot{m}_{FG} \cdot \overline{c_{FG}}(T_a - T_b) = \dot{m}_{FT}(h_4 - h_3) \dots (4)$$

Precalentador:

$$\dot{m}_{FG} \cdot \overline{c_{FG}}(T_b - T_c) = \dot{m}_{FT}(h_3 - h_2) \dots (5)$$

La temperatura del fluido geotérmico que ingresa al evaporador T_a se asume siempre conocida, mientras que la temperatura pinch la entrega cada fabricante de intercambiador.

b) Proceso de expansión en la turbina

El análisis energético para una turbina en el ciclo binario es igual al de una turbina de vapor con pequeñas variaciones insignificantes. Como supuestos se tiene que es un proceso adiabático y de régimen continuo, por lo tanto la potencia desarrollada por la turbina se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{FT}(h_4 - h_5) = \dot{m}_{FT} \eta_t (h_4 - h_{5,s}) \dots (6)$$

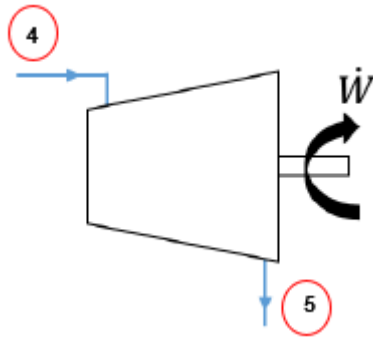


Figura N° 40: Esquema simplificado de una turbina

Fuente: Generación propia

c) Proceso de bombeo

Se utilizan los mismos supuestos que para la turbina, por lo tanto el trabajo específico y la potencia mecánica necesaria para el aumento de presión del fluido de trabajo se muestran a continuación:

$$w_b = (h_2 - h_1) \dots (7)$$

$$\dot{W}_b = \dot{m}_{FT}(h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}_{FT}(h_{2,s} - h_1)}{n_b} \dots (8)$$

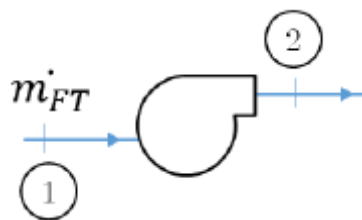


Figura N° 41: Esquema simplificado de una bomba

Fuente: Elaboración propia

d) Proceso de condensado

El calor transferido desde el fluido de trabajo y el medio de enfriamiento se puede obtener con la aplicación de la primera ley de la termodinámica considerando el mismo equipo como volumen de control. La relación entre el flujo másico del fluido de enfriamiento \dot{m}_{AE} y el fluido de trabajo se muestra a continuación:

$$\dot{m}_{AE}(h_y - h_x) = \dot{m}_{FT}(h_5 - h_1) \dots (9)$$

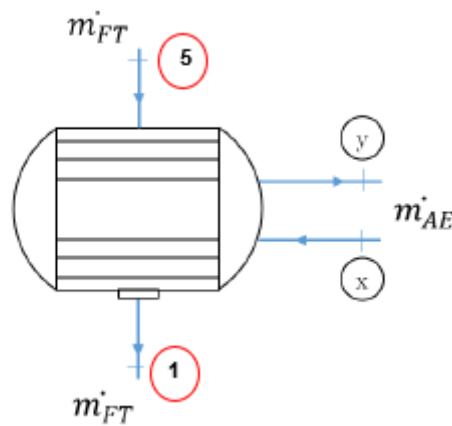


Figura N° 42: Esquema simplificado de un condensador de superficie

Fuente: Elaboración propia

e) Cálculos de flujo de masa

Se puede obtener el flujo de masa del fluido de trabajo requerido para generar la potencia eléctrica en la turbina con la siguiente fórmula:

$$W_e = (W_t - W_b) \cdot n_m \cdot n_g \dots (10)$$

$$W_e = [(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)] \cdot \dot{m}_{FT} \cdot n_t \cdot n_m \cdot n_g \dots (11)$$

n_t = eficiencia de la turbina

$$n_m = \text{eficiencia mecánica}$$

$$n_g = \text{eficiencia del generador}$$

f) Eficiencia de la central

Se utiliza la primera ley de la termodinámica para hallar la eficiencia térmica del ciclo secundario que se da por la relación de la potencia que genera el ciclo respecto al calor que ingresa al ciclo.

$$n_{th} = \frac{W_e}{Q_{in}} \dots (12)$$

Si se incluye las entalpías, así como el calor utilizado en la condensación del fluido de trabajo, se tiene la siguiente ecuación:

$$n_{th} = 1 - \frac{(h_5 - h_1)}{(h_4 - h_2)} \dots (13)$$

g) Fluido de trabajo

A continuación, se muestra la Tabla 8 con los fluidos típicos usados como fluido de trabajo en centrales de ciclo binario junto con sus propiedades más relevantes:

Tabla N° 9: Propiedades Termodinámicas de algunos fluidos de trabajo

Fluido	Fórmula	Peso molecular (gr/mol)	Tc (°C)	Pc (MPa)
Isobutano	i-C ₄ H ₁₀	58,12	135,92	3,685
R114	CIF ₂ C-CCIF ₂	170,9	145,68	3,257
Pentano	C ₅ H ₁₂	72,15	193,9	3,24

Fuente: (Matamala Aviles, 2014, pág. 47)

5.2. Resultados

5.2.1. Ciclo termodinámico

Para empezar con el dimensionamiento de la planta geotérmica de ciclo binario se establecen parámetros iniciales como conocidos, los cuales se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla N° 10: Parámetros iniciales de diseño

Parámetros iniciales de dimensionamiento		
Pa	7,8 bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	150 °C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	5,3 bar	Presión a la salida de la turbina
P2	21 bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	40°C	Temperatura de condensación
Ng	97%	Eficiencia del generador
Nm	87%	Eficiencia mecánica
Nt	88%	Eficiencia de la turbina
Nb	90%	Eficiencia de la bomba
ΔT_{pp}	5°C	Temperatura Pinch Point
Tx	22°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
mAE	70 kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
ΔP_{x-y}	0,5 bar	Pérdida de presión en el condensador
Px	1 bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
We	4,5 MW	Potencia eléctrica

Fuente: Elaboración propia

En el presente análisis se considera que el fluido geotérmico es agua, y por lo tanto usaremos dichas propiedades para el cálculo energético. Se analiza el ciclo para tres fluidos de trabajo: Isobutano, R114 y Pentano debido a que son de uso común en este tipo de centrales. Dado que este tipo de centrales de ciclo binario usan recursos de media entalpía se seleccionó el yacimiento geotérmico “Jesús María” el cual según su estudio tiene una temperatura de pozo de 150°C (Ta).

La presión de salida del fluido geotérmico (presión de entrada al evaporador) está limitada por la curva de producción característica de pozos geotérmicos la cual relaciona el flujo másico en función de la presión de boca de pozo y se muestra a continuación:

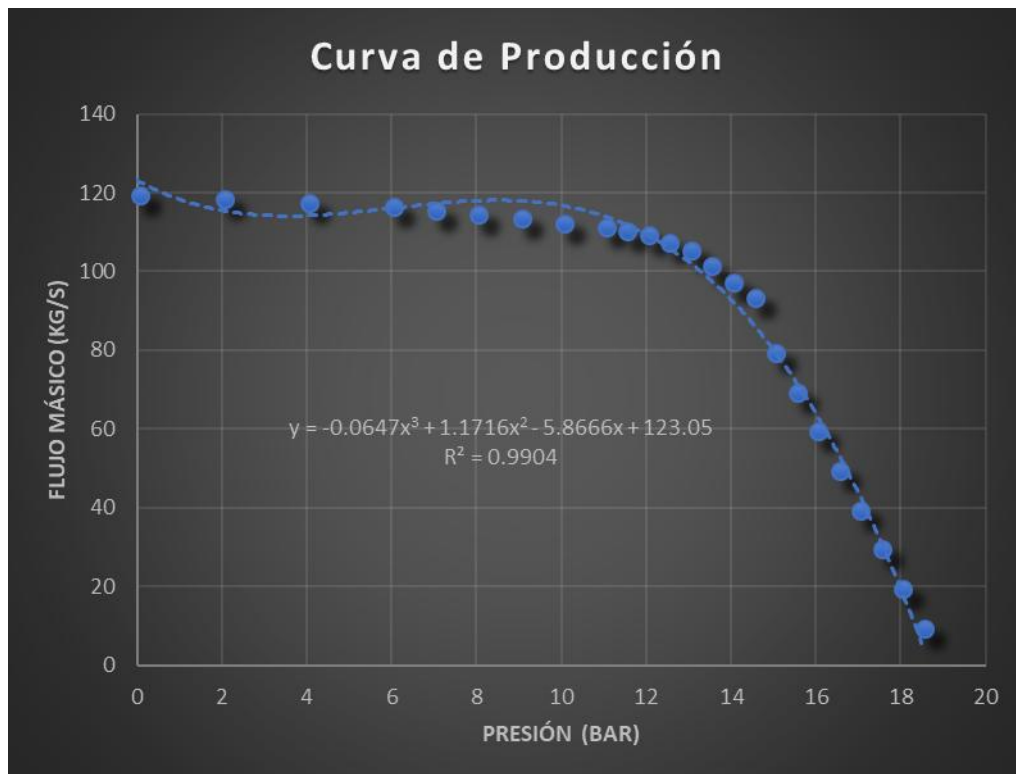


Figura N° 43: Curva de producción

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis energético se obviará que se necesita una bomba subterránea para que el fluido geotérmico llegue a la superficie y se dé el intercambio energético con el fluido de trabajo y se considerará que el fluido geotérmico llega a la superficie.

Para el análisis termodinámico del evaporador y precalentador se le agrega la variable de la temperatura “pinch point”; este parámetro lo proporciona generalmente el fabricante y para este caso se impone el valor de 5°C.

En cuanto a la temperatura de condensación (T1) se considera 40°C teniendo en cuenta las condiciones climáticas variables como la humedad relativa del aire, la temperatura ambiente y el flujo del aire que ingresa a la torre.

Con estos parámetros iniciales ya definidos se pueden calcular todos los demás parámetros faltantes en todos los puntos de la planta geotérmica binaria, a continuación, se muestran los resultados del análisis para un ciclo con fluido de trabajo isobutano:

a) En la bomba de condensado

Debido a que se conoce la presión ($P_1=P_5=5,3$ bar) y temperatura ($T_1=40^\circ\text{C}$) en el punto 1 (antes de la bomba de condensado) los otros parámetros se pueden determinar.

$$h_1=297 \text{ KJ/kg}, s_1=1,329 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}, x_1=0$$

En el punto 2, se conoce la presión ($P_2=P_3=P_4=21,7$ bar) e idealmente la entropía del fluido antes y después de la bomba son iguales ($s_1=s_{2i}= 1,329 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$). Con estos parámetros conocidos se puede calcular la entalpía ideal del fluido después de la bomba.

$$h_{2i}= 300,2 \text{ KJ/kg}$$

Luego de ello pasamos a corregir la entalpía considerando la eficiencia adiabática de la bomba ($n_b=90\%$)

$$h_2 = h_1 + \left(\frac{h_{2i} - h_1}{n_b} \right) \dots (14)$$

$$h_2=297 + \frac{(300,2-297)}{0.9}$$

$$h_2=300,55\text{KJ/kg}$$

Con la presión y la entalpía obtenidas se pueden calcular los otros parámetros reales correspondientes al punto 2.

$$s_2=1,33\text{KJ/kg}^\circ\text{C}, T_2=41,16^\circ\text{C}$$

b) En el precalentador

La calidad del isobutano en el punto 3 (después del precalentador) es igual a 0 ($x_3=0$) y la presión es igual a la presión de salida de la bomba ($P_2=P_3=21,77$ bar). Con estos datos es posible hallar los demás parámetros:

$$h_3 = 483,1\text{KJ/kg}, s_3=1,857\text{KJ/kg}^\circ\text{C}, T_3=105^\circ\text{C}$$

c) En el vaporizador

Acá es donde ocurre el cambio de estado del isobutano ($x_4=1$) y la presión es igual a la presión del precalentador ($P_3=P_4=21,77$ bar). Conociendo esto ya se pueden hallar los demás parámetros:

$$h_4=681,5\text{KJ/kg}, s_4=2,381\text{KJ/kg}^\circ\text{C}, T_4=105^\circ\text{C}$$

d) En la turbina

Idealmente la entropía antes y después de la turbina son iguales ($s_4=s_{5i}=2,381\text{KJ/kg}$) y junto con la presión después de la turbina ($P_5=5,3$ bar) hallamos la entalpía ideal del isobutano:

$$h_{5i}=626,8\text{KJ/kg}$$

Luego de hallado este parámetro se corrige la entalpía considerando la eficiencia adiabática de la turbina ($n_t=88\%$)

$$h_5 = h_4 - n_t(h_4 - h_{5i}) \dots (15)$$

$$h_5 = 681,5 - 0,88(681,5 - 626,8)$$

$$h_5=633,36\text{KJ/kg}$$

Con la presión y la entalpía obtenidas se pueden calcular los otros parámetros reales correspondientes al punto 5.

$$S_5=2,401\text{KJ/kg}^\circ\text{C}, T_5=52,8^\circ\text{C}$$

e) Flujo de masa del isobutano

Debido a que existe una curva de producción de un pozo geotérmico de media entalpía que me da una restricción de flujo del pozo geotérmico, se estima un flujo másico máximo de vapor de 115 kg/s. Se toma este parámetro aplicando un criterio de que pozo geotérmico, como toda máquina, no puede funcionar al 100 % de su capacidad. Con este parámetro dado se justifica la máxima potencia neta generada de 4.5 MW.

$$\dot{m}_{FT} = \frac{\dot{W}_e}{(W_t - W_b)} \dots (16)$$

$$\dot{m}_{FT} = 4500/(48,14 - 3,6)$$

$$\dot{m}_{FT} = 101,1 \text{ kg/s}$$

Para continuar con el análisis es necesario hallar la temperatura b (T_b) que la obtenemos utilizando la temperatura pinch point:

$$T_b = T_3 + \Delta T_{pp} \dots (17)$$

$$T_b = T_3 + \Delta T_{pp}$$

$$T_b = 105 + 5$$

$$T_b = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luego es necesario comprobar que el flujo del fluido geotérmico encaje o esté bordeando los 115 kg/s que nos proporciona la máxima potencia, para ello se usa siguiente fórmula que relaciona el flujo del fluido de trabajo con el flujo del fluido geotérmico:

$$\dot{m}_{FG} \cdot \overline{c_{FG}}(T_a - T_b) = \dot{m}_{FT}(h_4 - h_3) \dots (18)$$

$$\dot{m}_{FG} = \dot{m}_{FT} \frac{(h_4 - h_3)}{\overline{c_{FG}}(T_a - T_b)} \dots (19)$$

$$\dot{m}_{FG} = 101,1 \cdot \frac{(681,5 - 483,1)}{4,311(150 - 110)}$$

$$\dot{m}_{FG} = 116,3 \text{ kg/s}$$

Este cálculo justifica que la máxima potencia que puedo generar es de 4,5MW

f) En el condensador

Se conoce la presión de entrada del agua de enfriamiento ($P_x = 1 \text{ bar}$) y la temperatura 22°C con lo cuál obtengo los demás parámetros:

$$h_x = 92,29 \text{ KJ/kg}, s_x = 0,3246 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$$

Existe una pérdida de presión del agua refrigerante en el condensador la cual no es muy alta ($\Delta P_{x-y} = 0,5 \text{ bar}$)

$$P_y = P_x - \Delta P_{x-y}$$

$$P_y = 1 - 0,5$$

$$P_y = 0,5 \text{ bar}$$

Los flujos de masa tanto para el fluido de trabajo como para el agua de enfriamiento se mantienen constantes:

$$\dot{m}_{FT} = 101,1 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{AE} = 70 \text{ kg/s}$$

Mediante la siguiente ecuación se calcula la entalpía a la salida del condensador:

$$\dot{m}_{AE}(h_Y - h_X) = \dot{m}_{FT}(h_5 - h_1)$$

$$h_Y = 576,706 \text{ KJ/kg}$$

$$T_Y = 81,31^\circ\text{C}, s_Y = 1,757 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$$

g) Parámetros de entrada al evaporador (fluido geotérmico)

Se tienen los parámetros de temperatura de entrada al evaporador ($T_a = 150^\circ\text{C}$) y presión de entrada ($P_a = 7,7 \text{ bar}$). Esta presión de entrada al evaporador es la que maximiza la potencia del ciclo y también está limitada por la curva de producción de un pozo geotérmico.

$$h_a = 632,5 \text{ KJ/kg}, s_a = 1,842 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$$

h) Parámetros de salida del evaporador o entrada al precalentador (fluido geotérmico)

La temperatura en el punto b (T_b) se halla usando la temperatura pinch point de 5°C como lo vimos anteriormente.

$$T_b = T_3 + \Delta T_{pp}$$

$$T_b = 105 + 5$$

$$T_b = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teniendo este dato y la calidad del fluido en este punto ($x_b=0$) hallamos los parámetros faltantes:

$$h_b = 461,3 \text{ KJ/kg}, s_b = 1,419 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}, P_b = 1,432 \text{ bar}$$

i) Parámetros de salida del precalentador (fluido geotérmico)

Por las entalpías del isobutano, notamos que el 52 % del total de calor transferido del fluido geotérmico ocurre en el evaporador. Usando triángulos similares, podemos hallar la temperatura a la salida del precalentador (T_c).

$$\frac{T_a - T_c}{T_a - T_b} = \frac{h_4 - h_2}{h_4 - h_3} \dots (20)$$

$$T_c = 73,18^\circ\text{C}$$

Otra manera de corroborar la temperatura en el punto c (T_c) es utilizando la siguiente fórmula y se verifica que no hay una variación representativa.

$$\dot{m}_{FG} \cdot \overline{c_{FG}} (T_b - T_c) = \dot{m}_{FT} (h_3 - h_2)$$

$$T_c = 73,17^\circ\text{C}$$

Con este parámetro obtenido y la calidad del fluido en ese punto ($x_c=0$) se puede obtener los parámetros faltantes:

$$h_c=306,3\text{KJ/kg}, s_c=0,9936\text{KJ/kg}^\circ\text{C}, P_c=0,3572 \text{ bar}$$

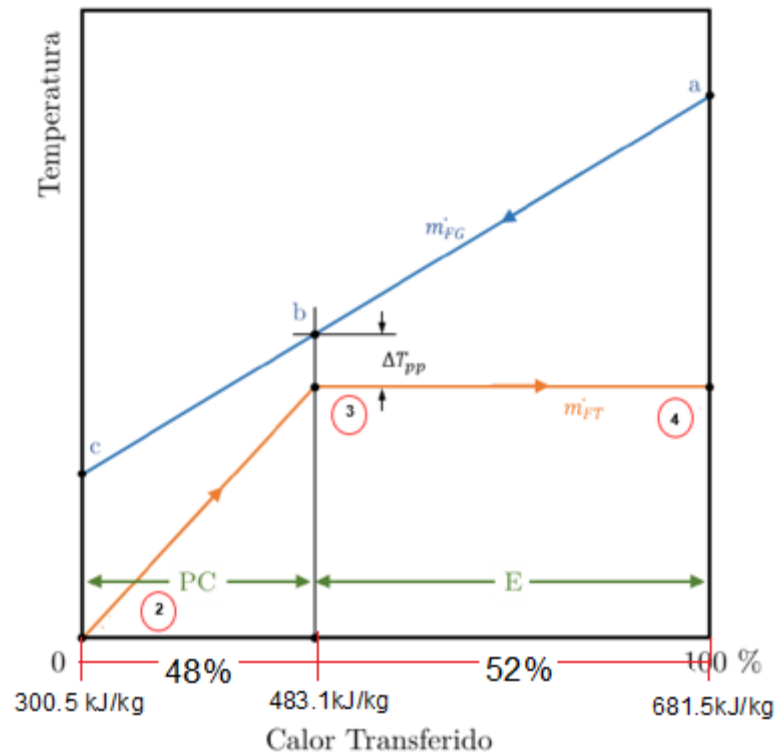


Figura N° 44: Diagrama temperatura vs calor transferido

Fuente: Elaboración propia

Para hallar el número de pozos (N_w) necesarios se tiene en cuenta que un pozo promedio puede producir entre 45-50 kg/s (\dot{m}_{pozo}). Por lo tanto, el número de pozos se puede obtener fácilmente con la siguiente fórmula:

$$N_w = \frac{\dot{m}_{FG}}{\dot{m}_{\text{pozo}}} \dots (21)$$

$$N_w = 115,97 / 50$$

$$N_w = 2 \text{ pozos}$$

En la siguiente Tabla 11 se muestran los resultados que fueron obtenidos usando el programa EES y el diagrama T-s del isobutano (figura. 45)

Tabla N° 11: Resultados de los parámetros de la planta geotérmica binaria con isobutano

Punto N°	hi	Pi	si	Ti	xi
1	297	5,309	1,329	40	-100
2	300,6	21,77	1,33	41,16	-100
3	483,1	21,77	1,857	105	0
4	681,5	21,77	2,381	105	1
5	633,4	5,309	2,401	52,8	100
A	632,5	7,7	1,842	150	-100
B	461,3	1,432	1,419	110	0
C	306,3	0,3572	0,9936	73,18	0

[1]	Estado 1 (isobutano)
[2]	Estado 2 real (isobutano)
[3]	Estado 3 (isobutano)
[4]	Estado 4 (isobutano)
[5]	Estado 5 real (isobutano)
[A]	Estado a (fluido geotérmico)
[B]	Estado b (fluido geotérmico)
[C]	Estado c (fluido geotérmico)
[X]	Estado x (agua de enfriamiento)
[Y]	Estado y (agua de enfriamiento)

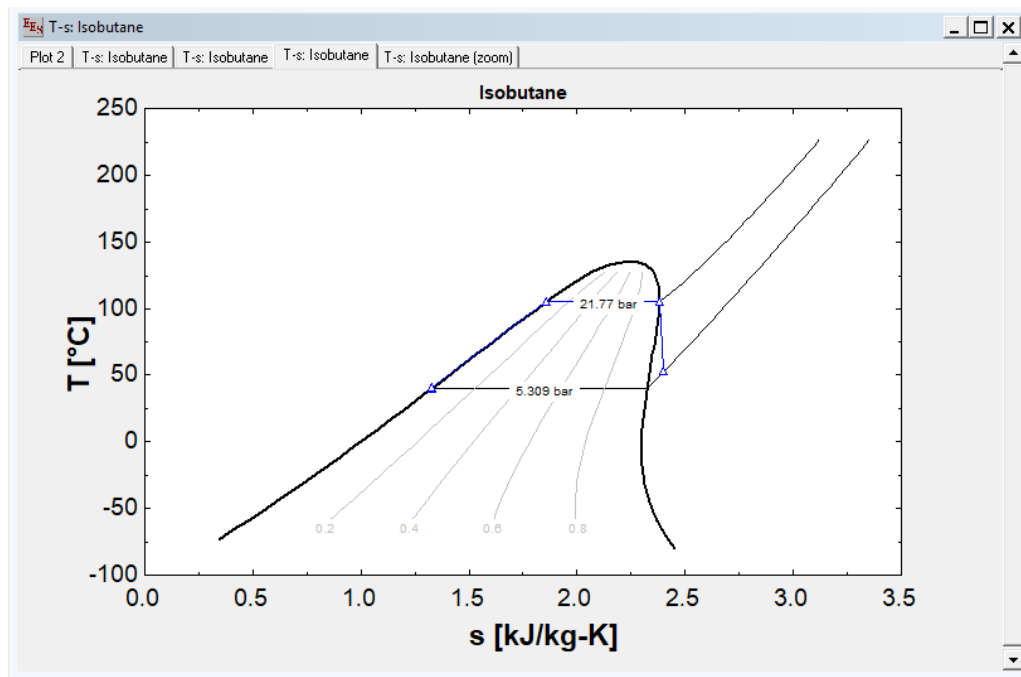


Figura N° 45: Diafragma T-s Isobutano

Fuente: Elaboración propia

Potencia de la bomba de condensado

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} F T (h_2 - h_1)}{n_b}$$

$$\dot{W}_b = \frac{101,1(300,5 - 297)}{0,9}$$

$$\dot{W}_b = 393,1 \text{ kW}$$

Potencia de la turbina

$$\dot{W}_t = \dot{m} F T n_t (h_4 - h_5)$$

$$\dot{W}_t = 101,1 * 0,88(681,5 - 633,36)$$

$$\dot{W}_t = 4282,91 \text{ kW}$$

Calor transferido al fluido de trabajo

$$\dot{Q}_{FT}=m_{FT}(h_4 - h_2)$$

$$\dot{Q}_{FT}=101,1(681,5 - 300,5)$$

$$\dot{Q}_{FT}=38519,1 \text{ kW}$$

Calor rechazado al agua de enfriamiento

$$\dot{Q}_{AE}=m_{FT}(h_5 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{AE}=101,1(633,36 - 297)$$

$$\dot{Q}_{AE}=34005,9 \text{ kW}$$

Eficiencia térmica del ciclo

$$n_c = \frac{W_e}{\dot{Q}_{FT}}$$

$$n_c = \frac{4500}{38519,1}$$

$$n_c = 11,71 \%$$

5.3. Selección de componentes

a) Pozo de producción

Con el número de pozos calculados, que para este caso son 2, hallamos el diámetro de tubería necesario para el transporte del fluido geotérmico:

$$D = \sqrt{\frac{4mh^{1,102}}{k\pi P_c^{0,96}}} \dots (22)$$

$$\dot{m} = \frac{115.97}{2}$$

$$\dot{m} = 57,98 kg/s$$

Tabla N° 12: Parámetros de tuberías

Flujo másico (kg/s)	h (kJ/kg)	Pc	D calculado (m)	D calculado (pulgadas)	Tubería Comercial
57,98	632,5	7,7	0,2628	10,34"	12"-SCH 30

b) Precalentador y evaporador

Debido a que el fluido geotérmico tiene agentes corrosivos, el precalentador y evaporador deben de ser de un material que soporte estas condiciones, por lo tanto se utiliza un acero inoxidable. Se tiene en cuenta que el fluido geotérmico no se expone al aire y se reinyecta al pozo.



Figura N° 46: Intercambiador de calor

Fuente: <https://www.tranter.com/literature/products/OITProdSheetScrn.pdf>

c) Turbina de vapor

Las especificaciones de la turbina son las siguientes:

Potencia de salida	: 5 MW
Presión máxima de entrada	: 25 bar
Temperatura máxima de entrada	: 200 °C
Presión máxima de salida:	: 7 bar
Número de etapas	: 1 (1flujo)



Figura N° 47: Turbina de vapor de una etapa

Fuente: https://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/E50001-W410-A101-V3-7800_ST%20Broschuere_SP_LR.pdf

d) Generador

Las especificaciones del generador son las siguientes:

Modelo : Generador síncrono trifásico

Potencia de salida : 10 MVA

Voltaje : 4160 V

Factor de potencia : 0,8

Frecuencia : 60 Hz



Figura N° 48: Generador síncrono

Fuente: <https://w3.siemens.com/drives/global/en/generators/Pages/sigentics-hv-serie-turbine-driven-new.aspx>

e) Condensador

Las principales especificaciones del condensador de superficie son las siguientes:

Flujo de agua de enfriamiento	: 70 kg/s
Flujo de vapor	: 101,1 kg/s
Presión de condensación	: 1 bar
Temperatura de agua de enfriamiento	: 22°C

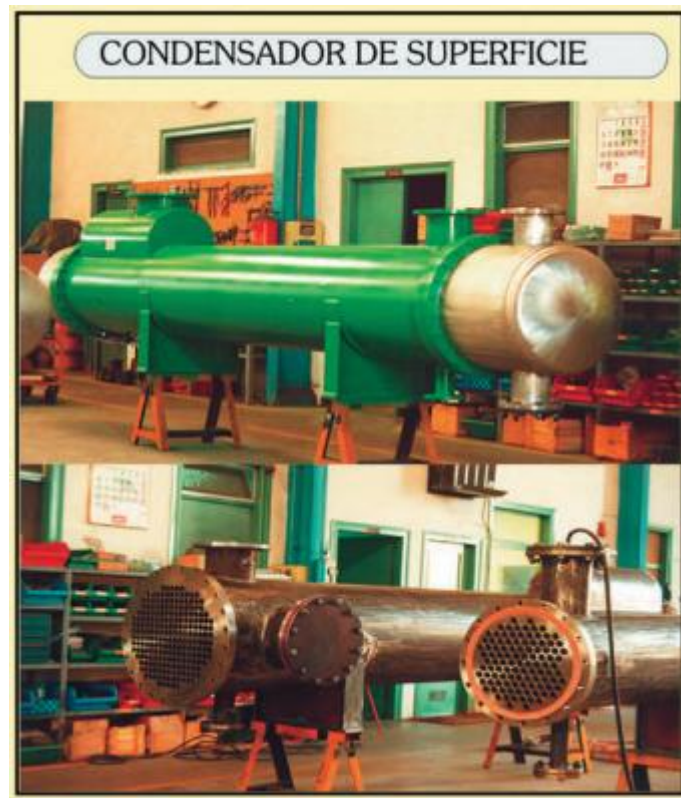


Figura N° 49: Condensador de superficie

Fuente: [http://www.equirepsa.com/equirepsa2011/wp-](http://www.equirepsa.com/equirepsa2011/wp-content/uploads/pdfs/FC_TV10_CondensadordeMezclaySuperficie_es.pdf)

[content/uploads/pdfs/FC_TV10_CondensadordeMezclaySuperficie_es.pdf](http://www.equirepsa.com/equirepsa2011/wp-content/uploads/pdfs/FC_TV10_CondensadordeMezclaySuperficie_es.pdf)

f) Torre de enfriamiento

Las principales especificaciones se mencionan a continuación:

Tipo : Húmedo, tiro inducido

Número de celdas : 2



Figura N° 50: Torre de enfriamiento

Fuente: <https://www.0grados.com/torres-de-enfriamiento/>

g) Equipos auxiliares

- Bomba de condensado y reinyección
- Sistema de alimentación de isobutano

5.4. Discusión de los resultados

Para calcular los resultados con los demás fluidos: R114 y Pentano se utilizan los mismos procedimientos, restricciones y fórmulas usadas con el Isobutano.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los diferentes fluidos:

a) R114:

Tabla N° 13: Parámetros iniciales de diseño para R114

Parámetros iniciales de dimensionamiento		
Pa	7,7 bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	150 °C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	3,4 bar	Presión a la salida de la turbina
P2	14,1 bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	40°C	Temperatura de condensación
ng	97 %	Eficiencia del generador
nm	87 %	Eficiencia mecánica
nt	88 %	Eficiencia de la turbina
nb	90 %	Eficiencia de la bomba
ΔT_{pp}	5°C	Temperatura Pinch Point
T_x	22°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
m_{AE}	70 kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
ΔP_{x-y}	0,5 bar	Pérdida de presión en el condensador
P_x	1 bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
We	4,25 MW	Potencia eléctrica

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 14: Resultados de los parámetros de la planta geotérmica binaria con R114

Punto N°	Hi	Pi	si	Ti	Xi
1	76,29	3,369	0,2791	40	-100
2	77,35	14,07	0,2825	41,01	-100
3	143,2	14,07	0,4719	100	0
4	232	14,07	0,7098	100	1
5	214	3,369	0,7172	60.4	100
A	632,5	7,7	1,842	150	-100
B	440,2	1,209	1,363	105	0
C	300,1	0,3358	0,976	71,73	0

[1]	Estado 1 (n-butano)
[2]	Estado 2 real (n-butano)
[3]	Estado 3 (n-butano)
[4]	Estado 4 (n-butano)
[5]	Estado 5 real (n-butano)
[A]	Estado a (fluido geotérmico)
[B]	Estado b (fluido geotérmico)
[C]	Estado c (fluido geotérmico)
[X]	Estado x (agua de enfriamiento)
[Y]	Estado y (agua de enfriamiento)

Leyenda

Tabla N° 15: Características de la central geotérmica binaria con R114

R114		
Potencia Neta	KW	4250
Flujo másico geotermal	kg/s	114,83
Flujo másico del fluido de trabajo	kg/s	250,88
Eficiencia térmica	%	10,5

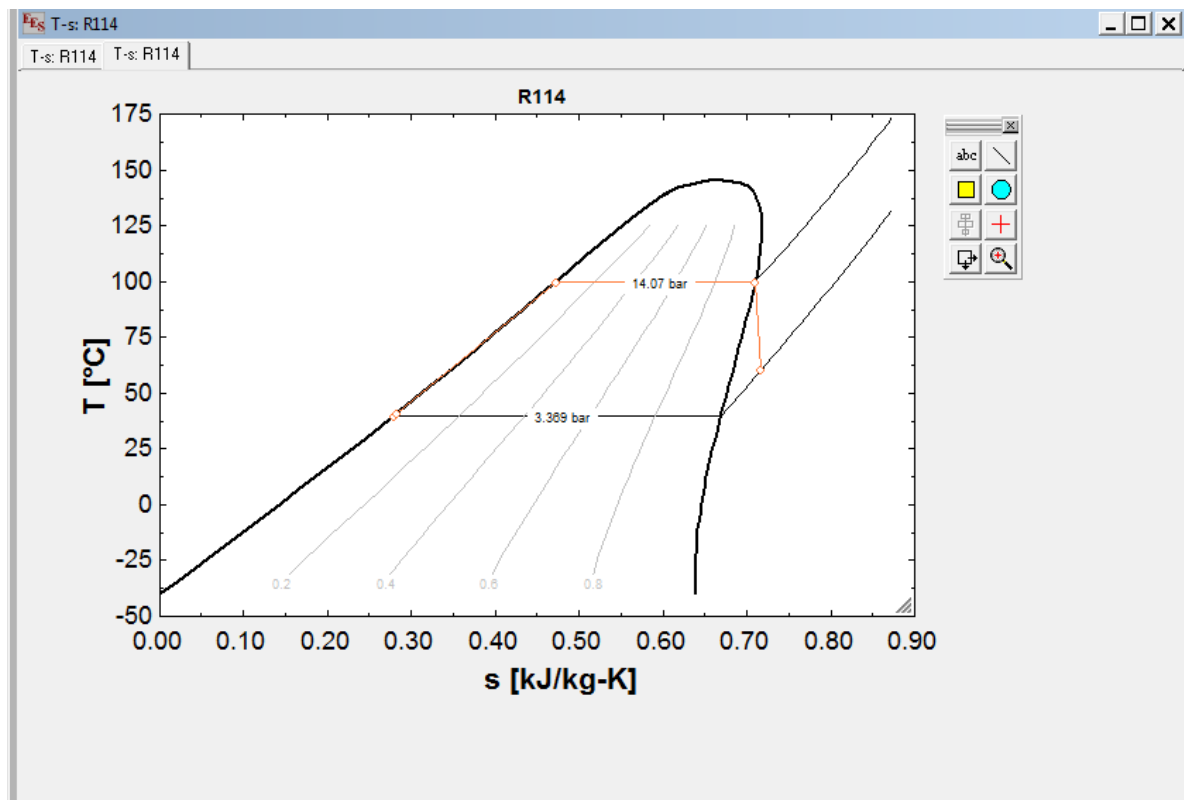


Figura N° 51: Diafragma T-s R114

Fuente: Elaboración propia

b) Pentano

Tabla N° 16: Parámetros iniciales de diseño para Pentano

Parámetros iniciales de dimensionamiento		
P_a	7,7 bar	Presión del fluido geotérmico
T_a	150 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura del fluido geotérmico
P_5	1,2 bar	Presión a la salida de la turbina
P_2	5,3 bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T_1	40 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura de condensación
ng	97%	Eficiencia del generador
nm	87%	Eficiencia mecánica
nt	88%	Eficiencia de la turbina
nb	90%	Eficiencia de la bomba
ΔT_{pp}	5 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura Pinch Point
T_x	22 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
m_{AE}	70 kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
ΔP_{x-y}	0,5 bar	Pérdida de presión en el condensador
P_x	1 bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
We	4,0MW	Potencia eléctrica

Tabla N° 17: Resultados de los parámetros de la planta geotérmica binaria con Pentano

Punto N°	hi	Pi	Si	Ti	Xi
1	33,2	1,16	0,1093	40	0
2	33,96	5,262	0,1015	40,19	-100
3	173	5,262	0,5177	94,94	0
4	475,3	5,262	1,339	94,94	1
5	426	1,16	1,359	61,04	100
A	632,5	7,7	1,842	150	-100
B	418,8	1,01	1,307	99,94	0
C	322,1	0,4179	1,039	76,94	0

[1]	Estado 1 (pentano)
[2]	Estado 2 real (pentano)
[3]	Estado 3 (pentano)
[4]	Estado 4 (pentano)
[5]	Estado 5 real (pentano)
[A]	Estado a (fluido geotérmico)
[B]	Estado b (fluido geotérmico)
[C]	Estado c (fluido geotérmico)
[X]	Estado x (agua de enfriamiento)
[Y]	Estado y (agua de enfriamiento)

Leyenda

Tabla N° 18: Características de la central geotérmica binaria con Pentano

Pentano		
Potencia Neta	KW	4000
Flujo másico geotermal	kg/s	115,4
Flujo másico del fluido de trabajo	kg/s	82,4
Eficiencia térmica	%	10,5

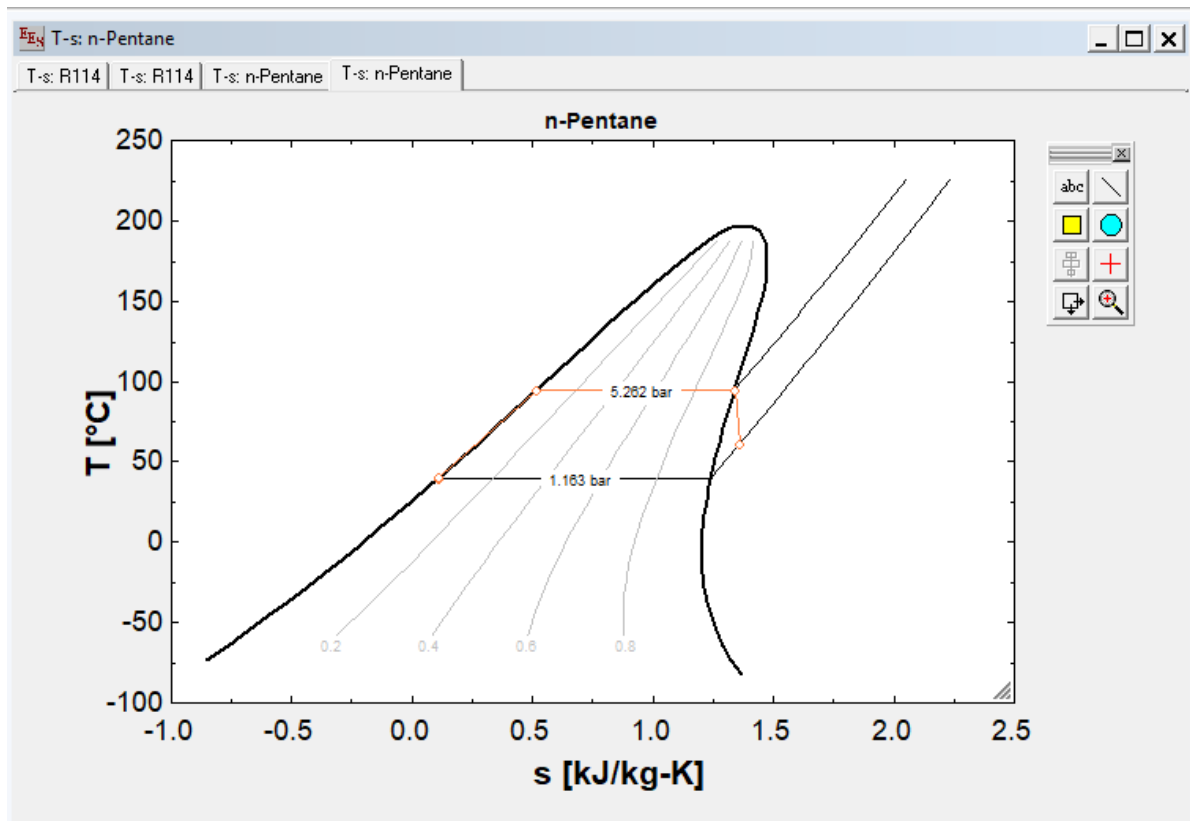


Figura N° 52: Diafragma T-s Pentano

Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados en la figura 53. Podemos observar que la máxima potencia generada se da con el uso del Isobutano como fluido de trabajo.

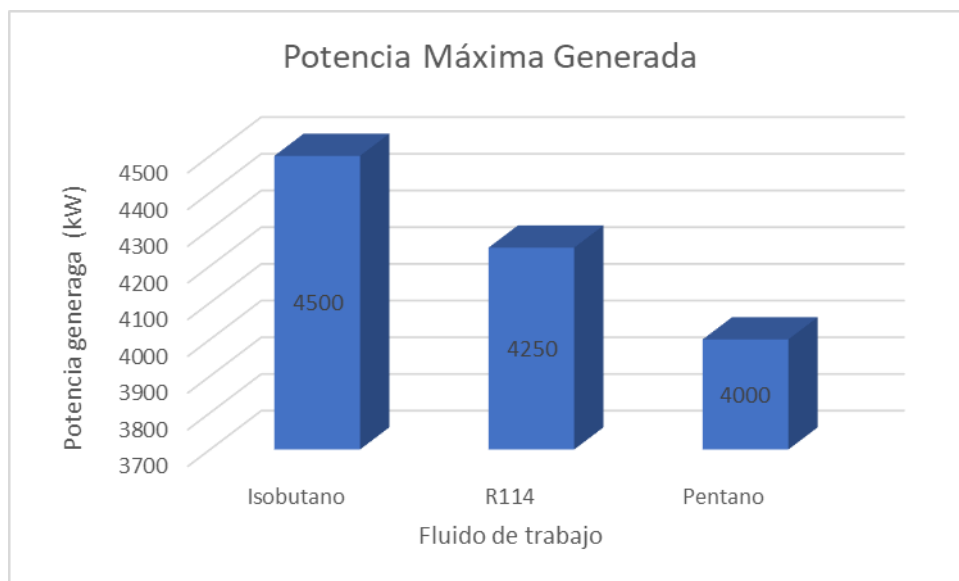


Figura N° 53: Potencia Máxima con diferentes fluidos de trabajo

Fuente: Elaboración Propia

5.5. Análisis económico

5.1.1. Definición de Inversiones, Costos e Ingresos

Inversiones

Se toman como referencias proyectos a nivel internacional con características similares para poder aplicarlas en nuestro caso. Por ello la inversión del proyecto de una central geotérmica consta de diversas etapas como se muestra en la figura N° 54. A continuación analizaremos cada una de estas etapas:

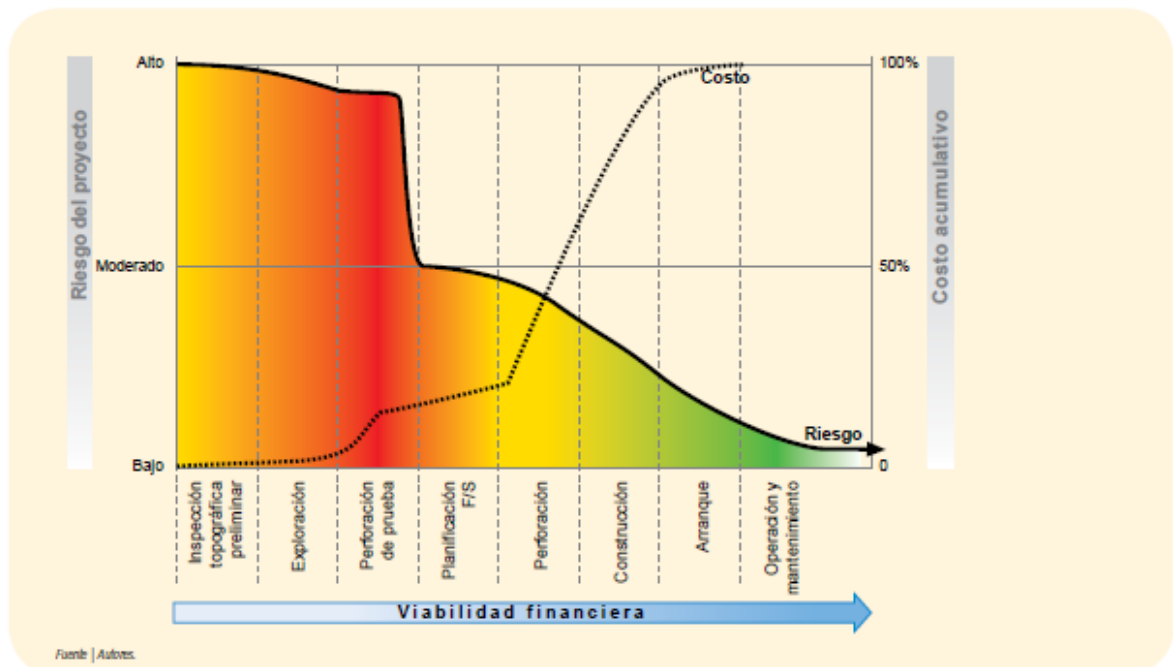


Figura N° 54: Perfil de riesgo en las diversas etapas de desarrollo del proyecto

Fuente: ESMAP, 2012, pág. 4

a) Etapa de exploración

Esta etapa es la más larga y riesgosa de todas ya que se requiere de una inversión fuerte de capital antes de saber si el recurso geotérmico cuenta con el suficiente potencial para recuperar lo invertido. Tiene como objetivo delimitar la topografía del terreno y abarca los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, junto con las perforaciones de prueba para establecer un potencial geotérmico que se acerque a la realidad. Según el estudio realizado por el Ingemmet al pozo geotérmico “Jesús María”, se realizaron pruebas a 3 manifestaciones geotérmicas. En la siguiente tabla N° 19 analizaremos los montos relacionados.

Tabla N° 19: Ítems de la etapa de perforación

Item	Monto Unitario (USD\$)	Manifestaciones Goetérmicas	Total (USD\$)
Perforación de pozos exploratorios	1 000 000	3	3 000 000
Estudio geoquímico	40 000	3	120 000
Estudio geológico	60 000	3	180 000
Estudio geofísico	100 000	3	300 000
		Total	3 600 000

b) Etapa de construcción

Dentro de esta etapa se toma en cuenta 3 grandes rasgos que son la planificación del proyecto, que consta de los estudios de pre factibilidad, estudios de impacto ambiental, la planificación del proyecto, contratos, etc. El segundo rasgo es la perforación de los pozos de producción que tienen un costo muy elevado y por último el tercer rasgo es la construcción de la planta que abarca varios ítems como la central generadora, enfriamiento, infraestructura, obras civiles, montaje, subestación, transmisión, entre otros.

Tabla N° 20: Ítems del rasgo de planificación

Planificación del Proyecto	Monto Total (USD\$)
Estudios de prefactibilidad	150 000
Estudios de impacto ambiental	100 000
Planificación del proyecto, contratos, etc.	400 000
Total	650 000

Tabla N° 21: Ítems del rasgo de perforación

Perforación de pozos de producción	Monto Unitario (USD\$)	Cantidad	Total (USD\$)
Perforación de pozos	1 500 000	2	300 000
Vaporductos	300 000	2	600 000
Acueductos	10 000	1	10 000
		Total	3 610 000

Tabla N° 22: Ítems del rasgo de construcción

Construcción de la planta	Monto Total (USD\$)
Maquinaria (central generadora, enfriamiento, infraestructura, ect)	6 000 000
Obras civiles	400 000
Montaje e instalación	300 000
Subestación y transmisión	1 800 000
Arranque y puesta en servicio	700 000
Total	9 200 000

Total Inversión: \$ 17 060 000,00

Costos

a) Costos de operación y mantenimiento

Estos costos involucran al personal para operar la planta como para operar el campo geotérmico, el mantenimiento de toda la planta, algunos gastos de administración y seguros e impuestos. Se toma como referencia un dato asumido

por otros autores (Budisulistyo, 2016) de USD 0,013\$/kWh. El costo anual de O&M anual viene ser de \$512 460.

b) Costos por permisos

Se tienen dos grandes ítems que es el costo por peajes de transmisión y por la concesión de explotación del campo geotérmico. Se estima un costo anual promedio de \$30 000.

Tabla N° 23: Ítems de costos

Costos	Monto anual (USD\$)
O&M	512 400
Permisos	30 000
Total	542 460

Ingresos anuales

a) Por venta de energía:

Tabla N° 24: Ingresos por venta de energía anuales

	POTENCIA (KW)	ENERGIA DISPONIBLE (kWh- mes)	COSTO ENERGIA (\$/./kWh)	ENERGIA ANUAL (kWh/año)	MONTO VENTA ANUAL (s/.)
VENTA DE ENERGIA	4,500.00	2 430 000	0,695	29 160 000	19 231 020
OPERACIÓN Y MTTO.	-	-	-	-	1 815 000
				TOTAL	17 416 020

5.1.2. Evaluación económica

Rentabilidad del proyecto:

ACTIVIDAD	VIDA PROYECTO	CANTIDAD	C. UNIT.	C. TOTAL	DEPRECIACIÓN
Estudios,Factibilidad y Perforacion Pozos	30	1	S/ 21 645 000,00	S/ 21 645 000,00	S/ 721 500,00
Vaporductos, Acueductos,Geologia, Etc.	30	1	S/ 3 960 000,00	S/ 3 960 000,00	S/ 132 000,00
Central Generadora, enfriamiento y otros	30	1	S/ 19 800 000,00	S/ 19 800 000,00	S/ 660 000,00
Obras Civiles y Montaje	30	1	S/ 2 310 000,00	S/ 2 310 000,00	S/ 77 000,00
Subestacion, Transmision y Puesta en Ser	30	1	S/ 8 250 000,00	S/ 8 250 000,00	S/ 275 000,00
					S/ 1 865 500,00

Tasa de Interes Anual	5,0%
Meses Pago	96,00
Importe Préstamo	S/ 67 158 000

CUOTA MENSUAL	S/ 850 214,91
CUOTA ANUAL	S/10 202 578,90

FONDOS GENERADOS	S/ 17 416 020
------------------	---------------

		Año 00	Año 01	Año 02	Año 03
	Inversión en el Período T	S/ 67 158 000			
INGRESOS	Fondos Generados		S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00
	Anualidad Préstamo		S/10 202 578,90	S/10 202 578,90	S/10 202 578,90
	Depreciacion de Equipos		S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00
EGRESOS	Estudios,Factibilidad y Perforacion Pozos		S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00
	Vaporductos, Acueductos,Geologia, Etc.		S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00
	Central Generadora, enfriamiento y otros		S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00
	Obras Civiles y Montaje		S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00
	Subestacion, Transmision y Puesta en Ser		S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00
	Flujo de Efectivo Neto		S/ 5 347 941,10	S/ 5 347 941,10	S/ 5 347 941,10

Año 04	Año 05	Año 06	Año 07	Año 08	Año 09	Año 10
S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00
S/10 202 578,90	S/10 202 578,90	S/10 202 578,90	S/10 202 578,90	S/10 202 578,90		
S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00
S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00
S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00
S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00
S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00
S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00
S/ 5 347 941,10	S/ 5 347 941,10	S/ 5 347 941,10	S/ 5 347 941,10	S/ 5 347 941,10	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00

Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17
S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00
S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00
S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00
S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00
S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00
S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00
S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00
S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00

Año 18	Año 19	Año 20
S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00	S/ 17 416 020,00
S/1 865 500,00	S/1 865 500,00	S/1 865 500,00
S/ 721 500,00	S/ 721 500,00	S/ 721 500,00
S/ 132 000,00	S/ 132 000,00	S/ 132 000,00
S/ 660 000,00	S/ 660 000,00	S/ 660 000,00
S/ 77 000,00	S/ 77 000,00	S/ 77 000,00
S/ 275 000,00	S/ 275 000,00	S/ 275 000,00
S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00	S/ 15 550 520,00

	S/- 67 158 000
AÑO 01	S/ 5 347 941,10
AÑO 02	S/ 5 347 941,10
AÑO 03	S/ 5 347 941,10
AÑO 04	S/ 5 347 941,10
AÑO 05	S/ 5 347 941,10
AÑO 06	S/ 5 347 941,10
AÑO 07	S/ 5 347 941,10
AÑO 08	S/ 5 347 941,10
AÑO 09	S/ 15 550 520,00
AÑO 10	S/ 15 550 520,00
AÑO 11	S/ 15 550 520,00
AÑO 12	S/ 15 550 520,00
AÑO 13	S/ 15 550 520,00
AÑO 14	S/ 15 550 520,00
AÑO 15	S/ 15 550 520,00
AÑO 16	S/ 15 550 520,00
AÑO 17	S/ 15 550 520,00
AÑO 18	S/ 15 550 520,00
AÑO 19	S/ 15 550 520,00
AÑO 20	S/ 15 550 520,00
n Años	20
T. de Descuento	5,0%

TASA INTERNA DE RETORNO(TIR)	
Tasa de Descuento	VAN
0%	S/ 162 231 768,82
4%	S/ 75 487 280,85
8%	S/ 26 888 760,40
12%	S/ - 1 687 004,19
16%	S/ - 19 277 269,82
20%	S/ - 30 582 428,60
24%	S/ - 38 146 659,14
28%	S/ - 43 399 914,85
32%	S/ - 47 174 956,28
36%	S/ - 49 973 228,54

Indicadores Economicos	Sistema Geotérmico
T. de Descuento	5,0%
VAN	S/ 60 694 413,06
TIR	12%

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

a) Producto del estudio, se cumplió con el objetivo de diseñar una central geotérmica de ciclo binario con una potencia instalada de 4,5MW.

b) Los equipos que componen el Ciclo Rankine Orgánico de la central geotérmica son:

1. Turbina de vapor
2. Generador síncrono
3. Condensador de superficie
4. Pre calentador y evaporador (intercambiadores de calor)
5. Bomba de condensado y re inyección
6. Torre de enfriamiento
7. Tuberías
8. Sistema de alimentación de Isobutano

c) Luego de comparar los fluidos de trabajo: Isobutano, Pentano y R114, se obtuvo que el fluido Isobutano es el fluido de trabajo que se comporta mejor para las condiciones de entrada al sistema ya que se puede generar una mayor potencia a condiciones estables.

d) Se dimensionó y seleccionó el caudal en kg/s del fluido de trabajo el cual es de 101,1 kg/s.

e) Se obtuvo la eficiencia energética de la planta la cual es de 11,7%, relativamente es baja, pero característica del tipo de planta de ciclo binario que van desde 8% hasta 14%.

f) Se realizó el análisis de rentabilidad obteniendo que la inversión para la planta geotérmica es de s/. 56 000 000 y los ingresos anuales por venta de energía son de s/. 17 416 020. Se obtuvo un VAN de s/. 60 694 413 y un TIR de 12% por lo que nos demuestra que es un proyecto factible, atractivo para la inversión y rentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Apaza Apaza, J., & Olazabal Reyes, J. A. (2014). *La Energía Geotérmica Como Alternativa Económica Y Sostenible para solucionar el Déficit De Generación Eléctrica En La Zona Sur Del Perú*. Lima.
- 2) Bagierek, M. (2010). *Design of A Geothermal Binary Sistem For Operation In Remote Areas*.
- 3) Barriga Grez, S. A. (2007). *GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA EN CHILE: ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES PARA SU DESARROLLO SUSTENTABLE*. Chile.
- 4) Cardemil Iglesias, J. M. (2006). *Modelacion de flujo bifasico en un pozo geotermico*. Santiago de Chile.
- 5) Cordova Zapata, L. F. (2007). *“DISEÑO DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 50 MW”*. Lima.
- 6) Godinez Huerta, C. (2013). *FACTIBILIDAD DE UN PROYECTO GEOTERMOELÉCTRICO PARA LA ZONA DE SAN MARCOS JALISCO*. Mexico.
- 7) IDAE. (2007). *Manual de Geotermia*. Madrid.
- 8) IDAE. (2011). *Evaluacion del potencial de energia termica*.
- 9) INGEMMET. (2014). *“Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua”*. Lima.
- 10) JICA. (2012). *“Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú”*.
- 11) Kopuničová, M. (2009). *Feasibility study of Binary Geothermal Power Plants In Eastern Slovakia*.
- 12) Llopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (s.f.). *Guía de la energía geotérmica*. Madrid.
- 13) Matamala Aviles, J. G. (2014). *ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE CICLOS TERMODINÁMICOS PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA A PARTIR DE RECURSOS GEOTERMALES DE MEDIA Y ALTA ENTALPÍA*. Santiago de Chile.
- 14) Pedro Lara, A. L. (2011). *Proyecto de una central geotermica en Ecuador*. Quito.

- 15) Piedra Lara, A. L. (2011). *Proyecto de una central geotermica en el Ecuador*. Quito.
- 16) Sierra, J. L. (1998). *Energía geotermica*.
- 17) UPME. (2003). *FORMULACIÓN DE UN PROGRAMA BÁSICO DE NORMALIZACIÓN PARA APLICACIONES DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y DIFUSIÓN*. Bogota.

ANEXOS

ANEXO 1:

FÓRMULAS PARA HALLAR LOS PARÁMETROS DE ENTALPÍAS

Isobutano

"estado 1"

P[1]=5.309

T[1]=40

h[1]=Enthalpy(Isobutane,T=T[1],P=P[1])

s[1]=Entropy(Isobutane,T=T[1],P=P[1])

v[1]=Volume(Isobutane,T=T[1],P=P[1])

x[1]=Quality(Isobutane,P=P[1],T=T[1])

"estado 2"

P[2]=21.77

h[2]=300.55

s[2]=Entropy(Isobutane,P=P[2],h=h[2])

v[2]=Volume(Isobutane,P=P[2],h=h[2])

x[2]=Quality(Isobutane,P=P[2],h=h[2])

T[2]=Temperature(Isobutane,P=P[2],h=h[2])

"estado 3"

P[3]=21.77

x[3]=0

h[3]=Enthalpy(Isobutane,P=P[3],x=x[3])

s[3]=Entropy(Isobutane,P=P[3],x=x[3])

v[3]=Volume(Isobutane,P=P[3],x=x[3])

T[3]=Temperature(Isobutane,P=P[3],x=x[3])

"estado 4"

P[4]=21.77

x[4]=1

h[4]=Enthalpy(Isobutane,P=P[4],x=x[4])

v[4]=Volume(Isobutane,P=P[4],x=x[4])

s[4]=Entropy(Isobutane,P=P[4],x=x[4])

T[4]=Temperature(Isobutane,P=P[4],x=x[4])

"estado 5"

P[5]=5.309

h[5]=633.36

s[5]=Entropy(Isobutane,P=P[5],h=h[5])

v[5]=Volume(Isobutane,P=P[5],h=h[5])

x[5]=Quality(Isobutane,P=P[5],h=h[5])

T[5]=Temperature(Isobutane,P=P[5],h=h[5])

Pentano:

"estado 1"

T[1]=40

x[1]=0

h[1]=Enthalpy(n-Pentane,P=P[1],x=x[1])

P[1]=Pressure(n-Pentane,T=T[1],x=x[1])

v[1]=Volume(n-Pentane,T=T[1],x=x[1])

s[1]=Entropy(n-Pentane,T=T[1],x=x[1])

"estado 2"

P[2]=5.262

h[2]=33.96

s[2]=Entropy(n-Pentane,P=P[2],h=h[2])

T[2]=Temperature(n-Pentane,P=P[2],h=h[2])

v[2]=Volume(n-Pentane,T=T[2],P=P[2])

x[2]=Quality(n-Pentane,T=T[2],h=h[2])

"estado 3"

P[3]=5.262

x[3]=0

h[3]=Enthalpy(n-Pentane,P=P[3],x=x[3])

s[3]=Entropy(n-Pentane,P=P[3],x=x[3])

v[3]=Volume(n-Pentane,P=P[3],x=x[3])

T[3]=Temperature(n-Pentane,P=P[3],x=x[3])

"estado 4"

P[4]=5.262

x[4]=1

h[4]=Enthalpy(n-Pentane,P=P[4],x=x[4])

v[4]=Volume(n-Pentane,P=P[4],x=x[4])

s[4]=Entropy(n-Pentane,P=P[4],x=x[4])

T[4]=Temperature(n-Pentane,P=P[4],x=x[4])

"estado 5"

P[5]=1.163

h[5]=426.02

s[5]=Entropy(n-Pentane,P=P[5],h=h[5])

v[5]=Volume(n-Pentane,P=P[5],h=h[5])

x[5]=Quality(n-Pentane,P=P[5],h=h[5])

T[5]=Temperature(n-Pentane,P=P[5],h=h[5])

R114:

"estado 1"

P[1]=3.369

T[1]=40

h[1]=Enthalpy(R114,T=T[1],P=P[1])

s[1]=Entropy(R114,T=T[1],P=P[1])

v[1]=Volume(R114,T=T[1],P=P[1])

x[1]=Quality(R114,P=P[1],T=T[1])

"estado 2"

P[2]=14.07

h[2]=77.35

s[2]=Entropy(R114,P=P[2],h=h[2])

T[2]=Temperature(R114,P=P[2],h=h[2])

v[2]=Volume(R114,T=T[2],P=P[2])

x[2]=Quality(R114,T=T[2],h=h[2])

"estado 3"

P[3]=14.07

x[3]=0

h[3]=Enthalpy(R114,P=P[3],x=x[3])

s[3]=Entropy(R114,P=P[3],x=x[3])

v[3]=Volume(R114,P=P[3],x=x[3])

T[3]=Temperature(R114,P=P[3],x=x[3])

"estado 4"

P[4]=14.07

x[4]=1

h[4]=Enthalpy(R114,P=P[4],x=x[4])

v[4]=Volume(R114,P=P[4],x=x[4])

s[4]=Entropy(R114,P=P[4],x=x[4])

T[4]=Temperature(R114,P=P[4],x=x[4])

"estado 5"

P[5]=3.369

h[5]=213.96

s[5]=Entropy(R114,P=P[5],h=h[5])

v[5]=Volume(R114,P=P[5],h=h[5])

x[5]=Quality(R114,P=P[5],h=h[5])

T[5]=Temperature(R114,P=P[5],h=h[5])

ANEXO 2:

CATÁLOGO DE TUBERÍAS



Tubos A53 /A106 API 5L/GR B SCH40/80/160

Máxima Presión PSI											
Medida Nominal inch (mm)	Cédula		Espesor de pared (mm)	Temperature (°C)							
				-67	205	260	350	370	400	430	450
				Maximum Allowable Stress (MPa)							
				137.8	137.8	130.2	117.1	115.7	89.6	74.4	59.9
12" (300)		20	6.35	695	695	658	591	584	452	376	303
		30	8.38	922	922	871	783	804	600	498	401
	STD		9.53	1050	1050	992	892	882	683	568	457
		40	10.31	1139	1139	1076	968	957	727	616	496
	XS		12.7	1410	1410	1333	1199	1184	916	761	614
		60	14.27	1591	1591	1503	1352	1336	1034	859	692
		80	17.48	1962	1962	1864	1667	1648	1275	1059	853
		100	21.44	2427	2427	2294	2063	2040	1578	1311	1056
	XXS	120	25.4	2903	2903	2743	2467	2438	1887	1567	1262
		140	28.58	3290	3290	3109	2796	2763	2138	1776	1431
14" (350)		160	33.32	3878	3878	3666	3297	3258	2521	2094	1687
		10	6.35	633	633	598	538	532	411	342	275
		20	7.92	791	791	749	674	666	515	428	345
	STD	30	9.53	954	954	902	811	802	621	516	416
		40	11.13	1119	1119	1060	951	939	728	605	487
	XS		12.7	1281	1281	1211	1089	1076	832	692	558
		60	15.09	1529	1529	1445	1300	1285	994	825	666
		80	19.05	1947	1947	1840	1655	1635	1410	1051	846
		100	23.83	2458	2458	2323	2090	2066	1598	1328	1069
		120	27.79	2891	2891	2732	2457	2428	1880	1561	1258
16" (400)		140	31.75	3331	3331	3148	2831	2798	2166	1799	1449
		160	35.71	3778	3778	3571	3212	3174	2456	2041	1644
		10	6.35	553	553	523	470	464	359	299	241
		20	7.92	692	692	654	588	581	450	374	301
	STD	30	9.53	833	833	787	709	701	542	450	363
	XS	40	12.7	1117	1117	1056	949	938	726	598	486
		60	16.66	1476	1476	1395	1255	1240	959	797	643
		80	21.44	1916	1916	1810	1628	1609	1245	1034	833
		100	26.19	2360	2360	2230	2007	1983	1534	1274	1026
		120	30.96	2815	2815	2660	2390	2364	1830	1520	1224
		140	36.53	3355	3355	3170	2851	2818	2180	1812	1459
		160	40.49	3745	3745	3540	3184	3147	2434	2023	1630

ANEXO 3:

CATÁLOGO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR

OBLONG-IN-TUBE PLATE HEAT EXCHANGER



Performance And Construction

Temperature, °F (°C)	-58 to +660 (-50 to +350) -330 to +930 (-200 to +500)
Plate Thickness, in. (mm)	0.024 (0.6)
Pressure, psi (bar)	Vacuum to 580 (Vacuum to 40)
Performance, Btu (kW-hr)	170,000, 270,000, 340,000, 680,000, 1,000,000, 1,400,000 (50, 80, 100, 200, 300, 400)
Nom. Length, in. (mm)	50 (1250)
Diameter, in. (mm)	20-40 (500-1000)
Tube Material Options	A516 Gr65 Carbon ^a , A537 Carbon ^a , 321 SS ^a , 316L SS, 316Ti SS
Plate Material Options	316L SS ^a , 316Ti SS, AL-6XN SS, 904L SS, Nickel 201, Monel 400, B265 Gr1 Titanium, Hastelloy [®] C-22

^aFor temperature range 14 to +660°F (-10 to +350°C) ^bFor temperature range -58 to +12°F (-50 to -11°C) ^cFor temperature range -330 to +930°F (-200 to +500°C)
^dStandard plate material.

Advantages

- Low construction height
- Low refrigerant charge compared to standard systems with built-on separators
- Fully welded, maintenance-free system
- Module-based construction
- Attractive price and delivery time

For a configuration and quote—

Provide the following data:

- Heat load
- Input and output temperatures
- Physical properties of media
- Desired nozzle dimensions
- Plates and shell material preferences

ANEXO 4:

CATÁLOGO DE TURBINAS DE VAPOR

Modelo	Parámetros de vapor (hasta máx.)	Potencia (MW)										
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	250	
SST-100	65 bar, 480 °C											
SST-150	103 bar, 505 °C											
SST-200	110 bar, 520 °C											
SST-300	120 bar, 520 °C											
SST-400	140 bar, 540 °C											
SST-500	30 bar, 400 °C	Doble flujo										
SST-600	140 bar, 540 °C											
SST-700	165 bar, 585 °C											
SST-800	140 bar, 540 °C											
SST-900	165 bar, 585 °C											



SST-100

Hasta 8,5 MW

La SST-100 es una turbina de carcasa simple, con reductor para accionamiento de generador; prefabricada incluyendo los álabes como solución económica. Se utiliza principalmente para aplicaciones industriales.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 8,5 MW
- Presión de entrada de hasta 65 bar
- Temperatura de entrada de hasta 480 °C
- Velocidad de giro de hasta 7.500 rpm
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 10 bar o condensación de hasta 1 bar
- Área de escape 0,22 m²

ANEXO 4:

CATÁLOGO DE GENERADOR

Industrial Generators HV Series Turbine Driven

Maximum efficiency supported by excellent robustness and flexibility –for turbine applications

Siemens generators of the Turbine Driven series are built to meet the highest demands and typical challenges of turbine applications. They supply optimum and precise adaptation to fluctuating power networks and loads. Whether using steam or gas turbines, in open air or building installations, the Siemens Industrial Generators Turbine Driven Series provide guaranteed efficiency levels up to 98.5%, at a capacity of 4 to 25 MVA. Moreover, with the SIGENTICS Turbine Driven series, Siemens offers generators that excel because of their extreme thermal resistance and mechanical strength plus their maximum reliability even under extreme conditions.



Brief overview	
Machine type	Synchronous generator with cylindrical pole rotor
Frame sizes	900 mm - 1,340 mm
Output range	4 MVA - 25 MVA
Speed	1,500 rpm - 1,800 rpm
Frequency	50 Hz / 60 Hz
Voltage	3.3 - 18 kV
Efficiency	Up to 98.3%
Insulation class	155 (F)
Type of cooling system	IC 01, IC 31, IC 81 W, IC616, IC611
Degree of protection	IP23, IP44, IP54, IP55
Mounting format	Horizontal feet mounted, flanged bearing shield, or shaft end
Standards	IEC60034, marine certification (DNV-GL, ABS, BV, LRS, CSS, RINA, RMRS, ...), IEC 60079, CSA, EAC TR CU
Ex standards	Zone 2 (1): Ex pZ Zone 2: Ex nA