



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,**  
**ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**



**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO**  
**PARA SU APROVECHAMIENTO MEDIANTE UNA CENTRAL DE**  
**CICLO BINARIO PARA GENERACIÓN DE POTENCIA**  
**ELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE PUTINA, REGIÓN DE PUNO -**  
**PERÚ.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. FRANKLIN BENJAMÍN QUISPE HUAYTA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2021**



## DEDICATORIA

*A Dios por su bondad y misericordia por guiar nuestro camino para cumplir nuestras metas y permitirnos vivir para seguir en el camino hacia el éxito.*

*A mis padres: Martin y Gumercinda. A mi padre por sus consejos, por inculcarme el respeto, la puntualidad, la responsabilidad y de actuar de forma justa con los prójimos. A mi madre por enseñarme los buenos valores, por poner ante todo la superación en los estudios y estar siempre para mí.*

*A mis hermanos: Romario y Alvis, por ser personas únicas en nuestras vidas a las que siempre apreciaremos con todo el corazón.*

*A mi novia Herica, por su compañía, por escucharme en todo momento, por sus palabras y dándome su apoyo y aceptando todas mis decisiones que he tomado en mi superación profesional.*

***Franklin Benjamin Quispe Huayta***



## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme dado salud y sabiduría para lograr mis objetivos en esta vida y por acompañarme en todo momento.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica por haber posibilitado mi formación académica y hacer de mi un profesional eficiente y competente.

Al director de tesis y jurados, que dedicaron una parte de su valioso tiempo para lograr este trabajo de investigación posible.

A todos los ingenieros y profesionales los cuales compartieron sus conocimientos conmigo, los cuales serán y son útiles para continuar mi vida profesional.

*Franklin Benjamin Quispe Huayta*



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 15**

**ABSTRACT..... 15**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1 OBJETIVOS..... 18**

1.1.1. Objetivo general ..... 18

1.1.2. Objetivos específicos..... 18

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES..... 20**

2.1.1 Antecedente internacional ..... 20

2.1.2. Antecedente nacional ..... 24

**2.2. EL CALOR DE LA TIERRA ..... 32**

2.2.1. Introducción ..... 32

2.2.2. Geotermia ..... 33



2.2.3. Manifestaciones geotérmicas .....	34
<b>2.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4. APLICACIONES Y TIPOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA .....</b>	<b>37</b>
2.4.1. Usos directos .....	38
<b>2.5. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO .....</b>	<b>39</b>
2.5.1. Mercado global.....	41
<b>2.6. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN AMÉRICA LATINA .....</b>	<b>54</b>
<b>2.7. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN PERÚ .....</b>	<b>55</b>
<b>2.8. TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS .....</b>	<b>61</b>
2.8.1. Sistemas hidrotermales.....	61
2.8.2. Sistemas de roca seca caliente.....	62
2.8.3. Sistemas geopresurizados.....	64
2.8.4. Sistemas marinos.....	64
2.8.5. Sistemas geotérmicos volcánicos.....	65
<b>2.9. TIPOS DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS .....</b>	<b>66</b>
2.9.1. Yacimientos de muy baja temperatura (menos de 30°C).....	66
2.9.2. Yacimientos de baja temperatura (entre 30°C y 90°C).....	67
2.9.3. Yacimientos de media temperatura (entre 90°C y 150°C).....	67
2.9.4. Yacimientos de alta temperatura (más de 150°C).....	67
<b>2.10. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA .....</b>	<b>68</b>
2.10.1. Procesos industriales: .....	68
2.10.2. Invernaderos .....	68
2.10.3. Acuicultura .....	69
2.10.4. Sector residencial y servicios .....	69



2.10.5. Generación de electricidad .....	69
<b>2.11. TIPOS DE PLANTAS GEOTÉRMICAS.....</b>	<b>71</b>
2.11.1. Plantas tipo Vapor Directo .....	71
2.11.2. Plantas tipo “Flash Steam” .....	73
2.11.3. Plantas tipo “Single Flash”.....	74
2.11.4. Plantas tipo “Double Flash Plants” .....	75
2.11.5. Plantas geotérmicas tipo Binario (Binary Plants) .....	76
2.11.5.1. Ciclo Rankine Orgánico (ORC).....	77
2.11.5.2. Ciclo Kalina.....	79

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO .....</b>	<b>81</b>
<b>3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO .....</b>	<b>82</b>
<b>3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.....</b>	<b>82</b>
3.3.1. Materiales .....	82
<b>3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO .....</b>	<b>84</b>
<b>3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO.....</b>	<b>84</b>
<b>3.6. PROCEDIMIENTO .....</b>	<b>87</b>
3.6.1. Fase de recopilación de datos.....	87
3.6.2. Fase de campo. ....	87
3.6.3. Base de datos.....	87
3.6.4. Análisis de datos.....	87
<b>3.7. VARIABLES .....</b>	<b>87</b>
3.7.1. Formulación de las variables.....	87



3.7.1.1. Variables independientes.....	87
3.7.1.2. Variables dependientes.....	87
<b>3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
3.8.1. Diseño de la planta .....	89
3.8.2. Cálculos.....	89
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
<b>4.1. RESULTADOS .....</b>	<b>97</b>
4.1.1. Análisis con los datos actuales de Putina .....	97
4.1.1. Amoniaco .....	97
4.1.2. Butano .....	100
4.1.3. Isobutano .....	103
4.1.4 Propano.....	106
4.1.5. R143a .....	109
<b>4.2. DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL BINARIA PARA 1.5 MW ..</b>	<b>114</b>
<b>4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>125</b>
<b>4.4. SELECCIÓN DEL ISOBUTANO.....</b>	<b>126</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>127</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>128</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>131</b>
ANEXO A: CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA PARA ORC.....	131
ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR.....	132



ANEXO C: CARACTERÍSTICAS DEL CONDENSADOR .....	133
ANEXO D: CARACTERÍSTICAS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO .....	134
ANEXO E: REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	135
ANEXO F: SOFTWARE EES PROFESIONAL V9.944-3D .....	138

Área : Energías Renovables

Tema : Energía Geotérmica

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 10 MARZO DEL 2021





## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1:</b> Volcán Kilauea en Hawai .....	32
<b>Figura N° 2:</b> Estructura interna de la Tierra. ....	34
<b>Figura N° 3:</b> Fumarolas, laguna de aguas termales y volcán de fango .....	35
<b>Figura N° 4:</b> Géiser Fly Ranch situado cerca de Gerlach en Nevada (EE.UU.).....	36
<b>Figura N° 5:</b> Energía geotérmica.....	37
<b>Figura N° 6:</b> Aplicación de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura .....	39
<b>Figura N° 7:</b> International Geothermal Power Nameplanet Capacity (MW).....	40
<b>Figura N° 8:</b> Geothermal Power Operating Capacity by Country.....	42
<b>Figura N° 9:</b> Capacity under Developmente by Country or territory (Mw).....	42
<b>Figura N° 10:</b> Sonoma Calpine 3, una de las plantas del complejo geotérmico The Geysers.....	44
<b>Figura N° 11:</b> Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México .....	45
<b>Figura N° 12:</b> Complejo Geotérmico Larderello. 769 MW. Italia .....	46
<b>Figura N° 13:</b> Complejo Geotérmico Olkaria. 540 MW. Kenia.....	47
<b>Figura N° 14:</b> Complejo Geotérmico Makban. 458 MW. Filipinas .....	48
<b>Figura N° 15:</b> Complejo Geotérmico Salton Sea. 340 MW. Estados Unidos .....	49
<b>Figura N° 16:</b> Complejo Geotérmico Hellisheidi. 303 MW. Islandia.....	50
<b>Figura N° 17:</b> Complejo Geotérmico Tiwi. 289 MW. Filipinas.....	51
<b>Figura N° 18:</b> Complejo Geotérmico Darajat. 259 MW. Indonesia.....	52
<b>Figura N° 19:</b> Complejo Geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas .....	53
<b>Figura N° 20:</b> Mapa geotérmico del Perú.....	59
<b>Figura N° 21:</b> Diagrama de las placas oceánicas y continentales .....	62
<b>Figura N° 22:</b> Sistemas Hidrotermales .....	62
<b>Figura N° 23:</b> Sistema de Roca Seca Caliente.....	64



<b>Figura N° 24:</b> Sistema Geotérmico Marino.....	65
<b>Figura N° 25:</b> Sistema Geotérmico Volcánico .....	66
<b>Figura N° 26:</b> Lindegus – Florida, Industria Cementera .....	70
<b>Figura N° 27:</b> Invernaderos geotérmicos.....	70
<b>Figura N° 28:</b> Criadero piscícola climatizado con agua geotérmica en Imperial Valley, California, EE.UU.....	70
<b>Figura N° 29:</b> Sistema de Calefacción Distrital con Fuentes Geotermales .....	71
<b>Figura N° 30:</b> Diagrama simplificado de una planta geotérmica de tipo vapor directo	72
<b>Figura N° 31:</b> Diagrama de planta geotérmica single flash.....	75
<b>Figura N° 32:</b> Diagrama de planta geotérmica Double flash .....	75
<b>Figura N° 33:</b> Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario .....	77
<b>Figura N° 34:</b> Esquema del ciclo orgánico Rankine .....	79
<b>Figura N° 35:</b> Equipo principal de plantas geotérmicas.....	80
<b>Figura N° 36:</b> Ubicación geográfica.....	81
<b>Figura N° 37:</b> Termómetro digital.....	83
<b>Figura N° 38:</b> GPS Garmin .....	83
<b>Figura N° 39:</b> EES Profesional.....	84
<b>Figura N° 40:</b> Planta geotérmica binaria propuesta.....	88
<b>Figura N° 41:</b> Esquema de la central de ciclo binario .....	90
<b>Figura N° 42:</b> Evaporador y precalentador.....	91
<b>Figura N° 43:</b> Diagrama Temperatura vs Calor transferido para precalentador y evaporador.....	92
<b>Figura N° 44:</b> Esquema simplificado de una turbina.....	93
<b>Figura N° 45:</b> Esquema simplificado de una bomba.....	94
<b>Figura N° 46:</b> Esquema simplificado de un condensador de superficie .....	94



<b>Figura N° 47:</b> Diagrama T-s Amoniaco .....	99
<b>Figura N° 48:</b> Diagrama T-h Amoniaco .....	99
<b>Figura N° 49:</b> Diagrama h-s Amoniaco.....	100
<b>Figura N° 50:</b> Diagrama T-s Butano .....	102
<b>Figura N° 51:</b> Diagrama T-h Butano .....	102
<b>Figura N° 52:</b> Diagrama h-s Butano.....	103
<b>Figura N° 53:</b> Diagrama T-s Isobutano .....	105
<b>Figura N° 54:</b> Diagrama T-h Isobutano.....	105
<b>Figura N° 55:</b> Diagrama h-s Isobutano.....	106
<b>Figura N° 56:</b> Diagrama T-s Propano.....	108
<b>Figura N° 57:</b> Diagrama T-h Propano .....	108
<b>Figura N° 58:</b> Diagrama h-s Propano .....	109
<b>Figura N° 59:</b> Diagrama T-s R143a.....	111
<b>Figura N° 60:</b> Diagrama T-h R143a .....	111
<b>Figura N° 61:</b> Diagrama h-s R143a.....	112
<b>Figura N° 62:</b> Potencia neta máxima de diferentes fluidos de trabajo .....	112
<b>Figura N° 63:</b> Potencia neta máxima a diferentes presiones en boca de pozo .....	113
<b>Figura N° 64:</b> Diagrama T-s Isobutano (1.5 MW) .....	122
<b>Figura N° 65:</b> Diagrama T-h Isobutano (1.5 MW).....	123
<b>Figura N° 66:</b> Diagrama h-s Isobutano (1.5 MW).....	123



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1:</b> Potencial geotérmico en América Central, el Caribe y América del Sur...	55
<b>Tabla N° 2:</b> Lotes Geotérmicos identificados para la Explotación.....	60
<b>Tabla N° 3:</b> Clasificación de los recursos geotérmicos en base a la temperatura.....	67
<b>Tabla N° 4:</b> Coordenadas geográficas .....	82
<b>Tabla N° 5:</b> Cuadro de temperatura – julio 2019.....	85
<b>Tabla N° 6:</b> Resultados de temperaturas julio 2019 .....	85
<b>Tabla N° 7:</b> Cuadro de temperatura – agosto 2019.....	86
<b>Tabla N° 8:</b> Resultados de temperaturas agosto 2019 .....	86
<b>Tabla N° 9:</b> Componentes de una planta de ciclo binario .....	89
<b>Tabla N° 10:</b> Propiedades Termodinámicas de algunos fluidos de trabajo.....	96
<b>Tabla N° 11:</b> Parámetros iniciales para Amoniaco.....	97
<b>Tabla N° 12:</b> Resultados de la planta geotérmica binaria para Amoniaco .....	98
<b>Tabla N° 13:</b> Características de la central geotérmica binaria para Amoniaco .....	98
<b>Tabla N° 14:</b> Parámetros iniciales para Butano.....	100
<b>Tabla N° 15:</b> Resultados de la planta geotérmica binaria para Butano .....	101
<b>Tabla N° 16:</b> Características de la central geotérmica binaria para Butano .....	101
<b>Tabla N° 17:</b> Parámetros iniciales para Isobutano.....	103
<b>Tabla N° 18:</b> Resultados de la planta geotérmica binaria para Isobutano .....	104
<b>Tabla N° 19:</b> Características de la central geotérmica binaria para Isobutano .....	104
<b>Tabla N° 20:</b> Parámetros iniciales para Propano .....	106
<b>Tabla N° 21:</b> Resultados de la planta geotérmica binaria para Propano.....	107
<b>Tabla N° 22:</b> Características de la central geotérmica binaria para Propano .....	107
<b>Tabla N° 23:</b> Parámetros iniciales para R143a.....	109
<b>Tabla N° 24:</b> Resultados de la planta geotérmica binaria para R143a .....	110



<b>Tabla N° 25:</b> Características de la central geotérmica binaria para R143a .....	110
<b>Tabla N° 26:</b> Cuadro de comparativo .....	113
<b>Tabla N° 27:</b> Parámetros iniciales para Isobutano (1.5 MW).....	114
<b>Tabla N° 28:</b> Resultados de la planta geotérmica binaria para Isobutano (1.5 MW) ..	122



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

$h$  = Entalpia Especifica [kJ/kg]

$T$  = Temperatura [°C]

$P$  = Presión [bar]

$s$  = Entropía Especifica [kJ/kgK]

$\dot{m}$  = Flujo de Másico [kg/s]

$\eta$  = Rendimiento

$x$  = Tipo de Vapor

$\dot{W}$  = Potencia [kW]

$Q$  = Calor [kW]

$\Delta$  = Diferencia

$AE$  = Agua de Enfriamiento



## RESUMEN

En el presente trabajo de estudio tuvo como objetivo dimensionar y seleccionar una central geotérmica binaria basada en el ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico) aprovechando las aguas termales de la ciudad de Putina, en la región de Puno – Perú. Proponiendo la reducción de la contaminación ambiental y aumentando la matriz energética de nuestro país, a la vez satisfacer y proveer de energía eléctrica limpia y renovable a la ciudad de Putina. El tipo de investigación fue aplicada y descriptiva porque se hizo uso de conocimientos y bases teóricas de la ingeniería para el dimensionamiento de la central geotérmica. Para el análisis técnico se consideró como fluido de trabajo el isobutano, refrigerante con bajo punto de ebullición y con características robustas y resistentes a bruscos cambios de presión y temperatura; también que el flujo másico del fluido geotérmico se mantiene constante al igual que su temperatura y se tomó en cuenta la eficiencia de los componentes principales del ciclo (turbina, generador, intercambiador de calor). Como resultado se obtuvo mediante un balance de masa, un flujo másico de 66.369 Kg/s de isobutano, y un flujo másico del fluido geotermal de 162.105 Kg/s. Bajo estos datos importantes la central geotérmica produce una potencia de 1.5 MW con una eficiencia de planta de 5.623%. La región de Puno en todo su territorio cuenta con muchas fuentes geotermales de temperaturas variables, los cuales se pueden aprovechar no solo como balnearios turísticos como son usados actualmente, sino como una fuente para generar energía eléctrica o para usarlo como calefactor en las viviendas.

**Palabras clave:** Central de Ciclo Binario, Isobutano, Flujo Másico, Entalpia, Fluidos Refrigerantes.

## ABSTRACT



The objective of this study was to dimension and select a binary geothermal plant based on the ORC cycle (Organic Rankine Cycle) taking advantage of the thermal waters of the city of Putina, in the Puno region - Peru. Proposing the reduction of environmental pollution and increasing the energy matrix of our country, at the same time satisfying and providing clean and renewable electricity to the city of Putina. The type of research was applied and descriptive because knowledge and theoretical bases of engineering were used for the sizing of the geothermal power plant. For the technical analysis, isobutane, a refrigerant with a low boiling point and with robust characteristics and resistant to sudden changes in pressure and temperature, was considered as workflow; also that the mass flow of the geothermal fluid is kept constant as is its temperature and the efficiency of the main components of the cycle (turbine, generator, heat exchanger) was taken into account. As a result, a mass flow of 66,369 Kg / s of isobutane was obtained through a mass balance, and a mass flow of the geothermal fluid of 162,105 Kg / s. Under these important data, the geothermal power plant produces a power of 1.5 MW with a plant efficiency of 5,623%. The Puno region in all its territory has many geothermal sources of variable temperatures, which can be used not only as tourist resorts as they are currently used, but also as a source to generate electricity or to use it as a heater in homes.

Keywords: Binary Cycle Power Plant, Isobutane, Mass Flow, Enthalpy, Refrigerant Fluids.





# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se seleccionó y dimensionó una central geotérmica ubicada en las aguas termales de la ciudad de Putina, ubicado en el departamento de Puno – Perú. Basado en el Ciclo Rankine Orgánico para el aprovechamiento de las aguas termales de baja entalpia, cuenta con un estudio de potencia geotérmico realizado por el INGEMMET y está autorizado para la explotación de sus recursos.

Hoy en día las centrales de ciclo binario son el tipo de planta geotérmica más utilizados para generar electricidad. Existen 155 unidades de ciclo binario en operación, generando 274 MW de electricidad en 16 países. Sin embargo, a pesa de constituir el 33% de todas las unidades geotérmicas en operación en el mundo, las plantas de ciclo binario generan, solamente el 3% del total de la energía eléctrica de origen geotérmico. (PINEDO MINES C. F., 2015)

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 ello que se busca utilizar tecnologías no convencionales para la generación de energía incrementando así la matriz energética.

La presente investigación se justifica, porque en nuestra región existen muchas fuentes de aguas termales, que reciben una utilización primaria consistente solo en la creación de balnearios para el esparcimiento de las personas locales y turistas nacionales y extranjeros. Sin embargo, existe una amplia gama de aplicaciones de energía térmica cuya manifestación principal es la existencia de fuentes de aguas termales. En esta investigación, abordamos el estudio del potencial de aprovechamiento de una de tantas fuentes termales de la región de Puno para la generación de energía eléctrica.



## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo general**

Dimensionar y Seleccionar una central geotérmica binaria basada en el ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico) aprovechando las fuentes geotérmicas de baja entalpia de las aguas termales de la ciudad de Putina en el departamento de Puno-Perú.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Determinar la potencia de generación eléctrica con distintos fluidos de trabajo a utilizar con parámetros actuales en las aguas termales de la ciudad de Putina, Puno – Perú.
- Dimensionar y seleccionar los componentes de un Ciclo Rankine Organico.
- Dimensionar, seleccionar e identificar el caudal en Kg/s del fluido geotermal y del fluido secundario de trabajo.



## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

En general, la palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la Tierra. La geotermia es una importante fuente de energía que caracteriza las zonas activas de la corteza terrestre y está ligada a una fuente de calor magmática, que se encuentra a varios kilómetros de profundidad en tierras volcánicas. La producción de vapor a partir de los acuíferos, está a temperaturas que oscilan entre 100 y 4,000 ° C.

En algunas zonas, los depósitos o corrientes de agua subterránea son calentados por el magma, hasta temperaturas a veces superiores a los 140 grados Celsius. Cuando el agua, o el vapor, emergen a la superficie a través de fisuras en la corteza, aparecen los géiseres, fumarolas y fuentes termales.

La energía geotérmica es aquella energía que se obtiene mediante la extracción y aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. Es por tanto esta energía calorífica, un recurso parcialmente renovable y de elevada disponibilidad.

En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos.

Aun cuando la geotermia ha existido siempre, no fue aprovechada sino hasta principios del siglo pasado que empezó a dársele uso en forma comercial, haciéndose notoria su existencia hace apenas cuatro décadas. En los años 70's con el incremento en el costo de los combustibles fósiles se le dio una importancia relevante, ayudando a suministrar parte de los requerimientos de energía de muchos países.



## 2.1. ANTECEDENTES

Los antecedentes y las investigaciones realizadas al tema son las siguientes:

### 2.1.1 Antecedente internacional

**GONZALES GARCÍA, JIMÉNEZ CARRANZA, & MELGAR ESCOBAR (2005)**, en su tesis titulado: “ESTUDIO TÉCNICO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE CICLO BINARIO EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN, USULUTÁN” se realizó un estudio del mercado eléctrico, exponiendo su definición, su naturaleza, operación del mercado eléctrico y su política económica. También se presenta la demanda y oferta de este mercado en el país durante el periodo de 2003 al primer semestre de 2004. Se diseñaron los componentes principales de una planta de ciclo binario para el campo geotérmico de Berlín, para ello se seleccionó el fluido de trabajo y los parámetros de diseño, así como el dimensionamiento de los componentes de tal planta; por ejemplo, intercambiadores de calor, turbina y torre de enfriamiento, entre otros. También, se diseñó y construyó un prototipo de intercambiador de calor para pruebas de corrosión, basándose en datos de flujo, temperatura y presión del campo geotérmico de Berlín. Se ha incluido un estudio y evaluación económica del proyecto desarrollando los temas de inversión inicial, determinación de costos, su clasificación en fijos y variables, costos globales y unitarios, ingresos y egresos, estado proforma, punto de equilibrio, finalizando con la evaluación económica que determina la Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR), el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

**MATAMALA AVILES (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” Donde 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 entalpia; los ciclos de una y dos etapas de expansión súbita. En el rango de baja entalpia, 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 entalpia calculada era cercano al 0,8% para cada 1% de sal en el geofluido, lo que se extrapoló a los valores de potencia obtenidos.

**BAGIEREK** (2011) 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), en su tesis titulado: “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 qué 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” Este proyecto tiene la finalidad de investigar, analizar y determinar si los actuales factores que conforman el escenario chileno requerido para el desarrollo de la energía geotermoeléctrica; favorecen la exploración, explotación y desarrollo sustentable de los recursos geotérmicos. El gran potencial geotérmico que exhibe Chile debido a su ubicación geográfica, convierte a la energía geotérmica en una opción viable para la generación de electricidad; presentando importantes ventajas frente a las energías convencionales tales como seguridad del suministro al disminuir la dependencia externa y aumentar la diversificación de fuentes energéticas. Además, la energía geotérmica posee una alta calidad, bajos costos operacionales y bajos impactos ambientales con un adecuado manejo. Como parte de las ERNC (Energías Renovables no Convencionales), la energía geotérmica puede contribuir a diversificar la matriz energética nacional, dependiente altamente de la importación de energías convencionales fósiles. El desarrollo efectivo y eficaz de los recursos



geotérmicos en Chile podría ser una contribución a la seguridad del abastecimiento energético, en un escenario que exhibe un aumento sostenido de la demanda de electricidad y permanentes oscilaciones del suministro externo. En la Política de Seguridad Energética (PSE) impulsada por el gobierno, las ERNC en general y la geotermia en particular, constituyen un aporte significativo a la seguridad del suministro energético, y además incorporan la sustentabilidad ambiental incluida en las políticas energéticas. Por eso, la PSE contempla promover y desarrollar todas las acciones necesarias para que el 15% de la nueva capacidad eléctrica instalada hacia el 2010 se logre a partir de ERNC. (Actualmente sólo representa el 2,4%). Para el logro de esta meta, las condiciones de competencia para las ERNC creadas por el marco regulatorio vigente desde 2004 ha impulsado su desarrollo mejorando la viabilidad técnica y económica de este tipo de proyectos, gracias a los privilegios otorgados. Es de suma importancia para la seguridad y diversificación de fuentes de la Matriz energética nacional, contar con recursos locales de generación eléctrica que exhiben costos de generación estables y contribuyen a disminuir la incertidumbre del precio de largo plazo de la energía. En el caso de los recursos geotérmicos, estos presentan además la ventaja de no depender de condiciones meteorológicas para su existencia, por lo que pueden garantizar la estabilidad de la energía geotermoeléctrica. Por lo expuesto anteriormente, se propone en este trabajo descubrir, investigar y analizar los distintos factores que conforman el escenario actual en Chile para el desarrollo sustentable de la energía geotérmica; generando un diagnóstico que permita conocer las barreras e incentivos para su avance.

### **2.1.2. Antecedente nacional**

**CÓRDOVA ZAPATA (2007)**, en su tesis titulado: “DISEÑO DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 50MW” El presente





trabajo tiene como objetivo principal diseñar una planta geotérmica eléctrica de ciclo combinado, con una turbina de dos etapas y a potencia instalada de 50 MW.

El alcance del diseño es el estudio del ciclo termodinámico y la selección de los componentes de la planta geotérmica de generación eléctrica. El enfoque del trabajo es mixto, predominantemente se desarrolla una investigación de la energía geotérmica y se realizan los cálculos respectivos para la selección de equipos.

El punto de partida del presente proyecto es el estudio preliminar de los recursos geotérmicos en nuestro país que realizó el Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Electricidad y, en coordinación con la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL).

En el primer capítulo se realiza una introducción, la cual se basa en los antecedentes, la justificación y se explica el objetivo del presente proyecto.

En el segundo capítulo se instruye al lector con conceptos básicos sobre energía geotérmica, clasificación de los recursos geotérmicos, fluidos hidrotérmicos, las aplicaciones de la energía geotérmica y sus antecedentes, la generación de energía eléctrica, el desarrollo mundial y el potencial geotérmico nacional.

En el tercer capítulo se explica el fundamento teórico del diseño de la planta, el cual contiene la descripción técnica de una planta geotérmica y el marco legal nacional.

En el cuarto capítulo se describe el diseño de la planta, teniendo en cuenta unas consideraciones preliminares, para luego realizar los cálculos y presentar los resultados.

Y en el quinto capítulo, se realiza un estudio económico-financiero, para lo cual se explican los criterios para la evaluación económica, se describen las inversiones, los costos e ingresos para luego realizar la evaluación económica, también se mencionan los criterios para el financiamiento y los entes con capacidad de inversión para concluir



demostrando la viabilidad de la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos de nuestro país.

El presente documento es de valiosa utilidad en varios aspectos. Desde el punto de vista académico, es una obra de consulta para estudiantes y profesionales de ingeniería que deseen iniciarse en el interesante mundo de la generación eléctrica con el uso de recursos geotérmicos. A nivel industrial, los recursos geotérmicos se pueden emplear en diferentes actividades industriales, las cuales se detallan en el presente proyecto.

Un especial agradecimiento al Centro Cultural Pablo Boner (CCPB) y al Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Mecánica Eléctrica (CEDIME), por el apoyo brindado durante la realización del presente proyecto y por su colaboración a mis compañeros Maikol Alexandr Aira Falcón y Diego Marco Antonio Trinidad Yupa.

**APAZA APAZA & OLAZÁBAL REYES (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.

Por lo tanto, de acuerdo al esquema local vigente y a la normativa, los beneficios y ahorros que una determinada tecnología ofrecen 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 el efectivo aporte que la energía geotérmica está en condiciones de brindar al país.

**PERALTA QUILLA & MIRANDA RODRIGUEZ (2017)**, en su tesis titulado: “ANÁLISIS DE ESTUDIO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA EMPLEANDO ISOBUTANO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA LOCALIDAD DE PUTINA”. El presente proyecto de tesis tiene como objetivo general realizar una investigación descriptiva para ver si es factible el aprovechamiento de las Aguas Termales De Putina – Puno, para la generación de energía eléctrica de pequeña potencia; en la evaluación técnica para determinar la posibilidad del aprovechamiento del recurso geotérmico que se encuentra en los baños de Putina de la provincia de San Antonio de Putina , el cual presenta una geotermometría promedio de 62°C, debido a esto se opta por el ciclo binario, utilizando el Isobutano como fluido de trabajo teniendo en cuenta sus propiedades físico químicas, para el cálculo se ha utilizado el software EES versión 6.883. El proyecto de investigación



se organizó de la siguiente manera: en primer lugar, se realizó una investigación exhaustiva de la bibliografía relacionada con los sistemas geotérmicos. Se ha realizado la identificación de las fuentes geotermales más importantes del departamento, se realizó el análisis de las implicancias y obstáculos que presenta la realización del presente proyecto, para de esta manera poder cumplir con los objetivos planteados mencionados anteriormente, el aporte principal de la presente investigación se enfoca en la cantidad de energía eléctrica que se puede generar a partir de fuentes geotermales de baja temperatura.

**MAMANI CHARCA & GUILLEN ALANOCA** (2019), en su tesis titulado: “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA FUENTE TERMAL PUENTE BELLO TITIRE, DISTRITO DE PICHACANI PUNO, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”. El presente trabajo de investigación se focaliza en la evaluación del potencial geotérmico para determinar la capacidad del aprovechamiento del recurso geotérmico que se ubica a las faldas del cerro Puente Ccollo, en el sector de Titire, distrito de Pichacani, provincia y departamento de Puno, Se enmarca dentro de la investigación cuantitativa, descriptiva correlacional, sobre el río Titire. El proyecto de tesis tiene como objetivo principal la Evaluación del Potencial Geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, para la Generación de Energía Eléctrica; como objetivos específicos se realizara la evaluación de las características del potencial geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello, que permitirá adoptar la mejor tecnología en cuanto a la eficiencia termodinámica que se podrá analizar lo que a la vez nos permitirá realizar el segundo objetivo específico que corresponde al de seleccionar e identificar las características del fluido secundario de trabajo para el aprovechamiento de energía geotérmica el cual nos permite realizar el estudio termodinámico del fluido de trabajo y el ciclo termodinámico para poder determinar las entalpías y el trabajo termodinámico del ciclo lo que nos conduce al tercer objetivo del



presente proyecto de investigación y el más importante el cual es determinar la potencia de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de la fuente termal Puente Bello que se podría generar el cual es el principal aporte de la presente investigación y la cual se podría también replicar en las distintas fuentes termales existentes en la región.

**PINEDO MINES & RAMIREZ PINTADO** (2015), en su tesis titulado: “ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA SU APROVECHAMIENTO MEDIANTE UNA CENTRAL DE CICLO BINARIO PARA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN LA REGIÓN CORONGO-ANCASH, PERU”. En los estudios realizados por INGEMET se desarrolló el mapa de regiones geotermales del Perú, en el cual se establecen 6 regiones geotermales en el siguiente orden: Cajamarca - La Libertad (Cajamarca y sierra norte de La Libertad), Callejón de Huaylas (sierra sur de La Libertad, sierra de Ancash y Huánuco), Churín (Lima, Huánuco, Pasco y Junín), Central (Junín, Lima, Huancavelica y Ayacucho), Eje Volcánico Sur (Apuímac, Cuzco, Arequipa, Moquegua y Tacna), Cuzco - Puno (Cuzco, Puno y parte de Madre de Dios). De todas éstas regiones sólo la región Eje Volcánico Sur y Callejón de Huaylas son zonas de interés geotérmico.

En la región Callejón de Huaylas se definen 3 lotes geotérmicos: Huaraz, Caraz, Corongo, siendo la última la zona de investigación de este proyecto debido a que sus fuentes hidrotermales presentan las temperaturas adecuadas.

Este proyecto se centra en la evaluación técnica y económica para determinar la viabilidad del aprovechamiento del recurso geotérmico que se encuentra en los baños de Aquilina de la provincia de Corongo, el cual presenta una geotermometría de 220°C a 290°C, pero sus aguas poseen altos contenidos de arsénico y otros minerales que pueden resultar corrosivos para su aprovechamiento directo por lo que se opta por el ciclo binario.



Para el análisis técnico se ha considerado como fluido de trabajo el isopentano, refrigerante con bajo punto de ebullición (28 °C) y con características robustas resistentes a bruscos cambios de presión y temperatura; también que el flujo másico del fluido geotérmico se mantiene constante al igual que su temperatura y se tomó en cuenta la eficiencia de los componentes principales del ciclo (turbina, generador, intercambiador de calor).

Como resultado obtuvimos mediante balance de masa, un flujo másico de 55.48 Kg/s de isopentano, considerando las condiciones de la región y un flujo másico del fluido geotermal de 15 Kg/sg. Bajo este dato importante la central geotérmica produce una potencia eléctrica de 4.127 MW con una eficiencia de planta de 20 %

Para el análisis económico se consideró, un periodo de análisis de 20 años, el despacho en base y los precios en barra publicados por OSINERGMIN. Según nuestros cálculos de ingeniería obtuvimos una inversión inicial total de 16,430,744.63 US\$, ingresos anuales de 1,820,953.28 US\$/año por venta potencia y energía considerando el precio en la barra de potencia en Huallanca, egresos anuales de 941,101.33 US\$/año, un VAN de -9,858,740.00 US\$ índice que muestra un valor negativo, lo que significa que el proyecto no es rentable, PRI índice de años de recuperación de la inversión muestra 18.67 años. Estos índices económicos muestran la gran inversión y la poca rentabilidad que se tiene en el proyecto de la central geotérmica, como todos los proyectos de recursos renovables estos tienen que ser subsidiados por el estado según la Ley de Promoción de Recursos Renovables DL 1002-2008.

**BULNES JIMÉNEZ** (2018), en su tesis titulado: “DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA BASADA EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO UBICADA EN EL YACIMIENTO GEOTÉRMICO JESÚS MARÍA - MOQUEGUA”. 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.

## 2.2. EL CALOR DE LA TIERRA

Hace unos 4.500 millones de años. La Tierra era una inmensa bola ardiente constituida esencialmente por gases y polvo. Cuando esa nebulosa se enfrió y se consolidó, hace unos 3.800 millones de años, se formó una corteza dura que atrapó en su interior una ingente cantidad de calor, que todavía perdura hoy en día haciendo del planeta una enorme caldera natural.

### 2.2.1. Introducción

El planeta Tierra no es un cuerpo inerte y frío perdido en el espacio y arrastrado pasivamente por la fuerza gravitacional del Sol. Desde el punto de vista energético constituye un sistema activo que recibe y comunica energía al medio que le rodea, y el calor es una parte de esa energía.

Todos los procesos geodinámicos que suceden en la Tierra, desde los procesos más superficiales, hasta los volcanes, las intrusiones, los terremotos, la formación de cordilleras y el metamorfismo, son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior.

**Figura N° 1: Volcán Kilauea en Hawai**



Fuente: ©2001 Geothermal Education Office.





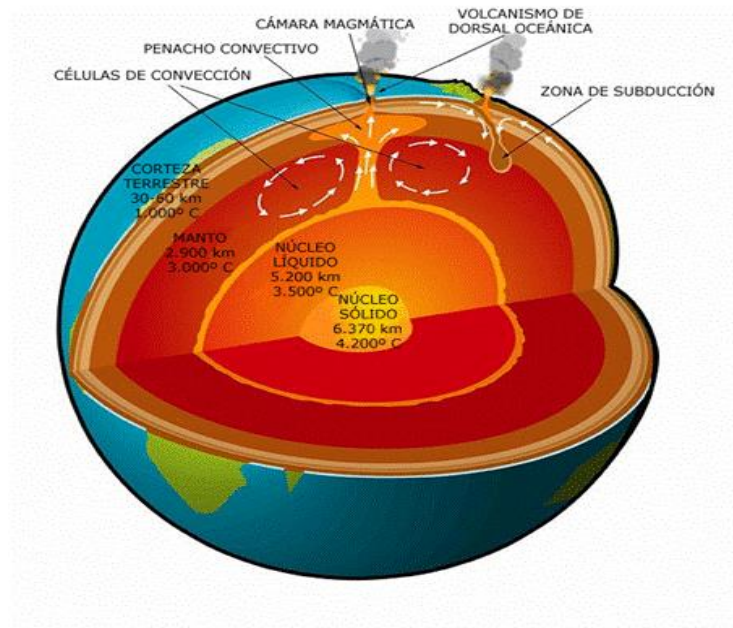
El calor es también el motor de la tectónica de placas, que involucra a la litosfera y a la astenosfera, y de otros procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección entre el manto y el núcleo externo.

Hace más de 250 años que se pudo constatar el hecho de que en las minas, la temperatura aumenta con la profundidad a un ritmo de, aproximadamente, 1 °C cada 30 m, y la existencia, en determinadas regiones del planeta, de volcanes con erupción periódica de rocas en estado de fusión, de fumarolas con vapores y gases calientes que pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1.000 °C, de fuentes termales y otras manifestaciones térmicas atestiguan la existencia de un calor que proviene del interior de la tierra.

### **2.2.2. Geotermia**

**Geotermia** es una palabra de origen griego, deriva de “goes” 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).

**Figura N° 2: Estructura interna de la Tierra.**



Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM

### 2.2.3. Manifestaciones geotérmicas

Determinadas zonas de la litosfera están sometidas a tensiones que generan gran cantidad de calor y presión, produciéndose fracturas y fallas por las cuales pueden ascender desde el manto, **magmas**, masas de rocas incandescentes, en estado de fusión total o parcial, con pequeñas cantidades de materias volátiles como agua, anhídrido carbónico, ácidos sulfúrico y clorhídrico, etc.

Si las condiciones tectónicas son favorables, los magmas, por su movilidad, pueden ejercer un empuje hacia arriba y romper la costra superficial de la Tierra, formando volcanes por los que se desparraman lavas, cenizas y gases.

Se estima que, para una determinada cantidad de magma arrojado por un volcán, un volumen diez veces mayor permanece debajo de la superficie, formando cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes.

Si esas rocas son permeables o están fracturadas, y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas, pudiendo ascender hasta la superficie

a través de grietas o fallas, dando lugar a la formación de aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes de fango.

**Figura N° 3: Fumarolas, laguna de aguas termales y volcán de fango**



Fuente: (©2001 Geothermal Education Office).

Estos fenómenos tienen características singulares que los diferencian de los afloramientos de aguas comunes. Por estar siempre asociados a las fases póstumas de los procesos magmáticos, además de la alta temperatura que presentan, están acompañados de gases, principalmente carbónicos o sulfurosos, produciendo estos últimos un olor fétido sumamente desagradable.

Juntamente con los volcanes, constituyen las manifestaciones superficiales visibles del calor de la Tierra, y son los que tradicionalmente han atraído la investigación y el estudio de los recursos de energía geotérmica.

- **Volcán:** Abertura en la corteza terrestre por la cual sale lava, vapor y/o cenizas con fuerza, o se derraman continuamente o a intervalos.
- **Aguas termales:** Manantial natural del que brota agua más caliente que la temperatura del cuerpo humano. Puede congregarse en lagunas o fluir por arroyos.

- **Géiser:** Surtidor intermitente de agua líquida mezclada con vapor de agua, a una temperatura entre 70 y 100°C, con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión.

Los minerales disueltos en el agua quedan depositados alrededor del géiser a modo de escoria o de sílice amorfa (geiserita). Muchos géiseres en el mundo se han extinguido o vuelto inactivo por causas naturales o por la instalación en sus inmediaciones de plantas de energía geotérmicas, como, por ejemplo, en Wairakei (Nueva Zelanda) y en Nevada (EE.UU.). La mayor concentración de géiseres se encuentra en el Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, EE.UU.).

**Figura N° 4: Géiser Fly Ranch situado cerca de Gerlach en Nevada (EE.UU.)**



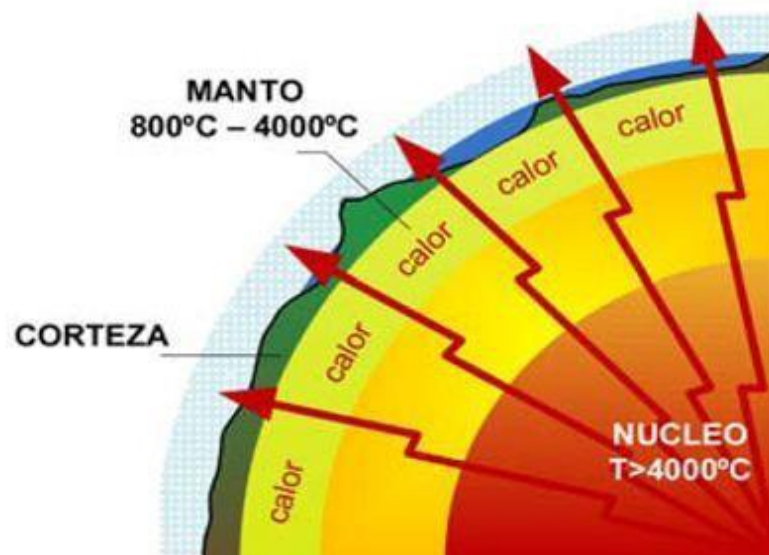
Fuente: Hill, R. Sandia National Laboratories.

### **2.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA**

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° 5).

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. (Córdova Zapata, 2007)

**Figura N° 5: 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.

#### **2.4. APLICACIONES Y TIPOS DE 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.

#### **2.4.1. 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.

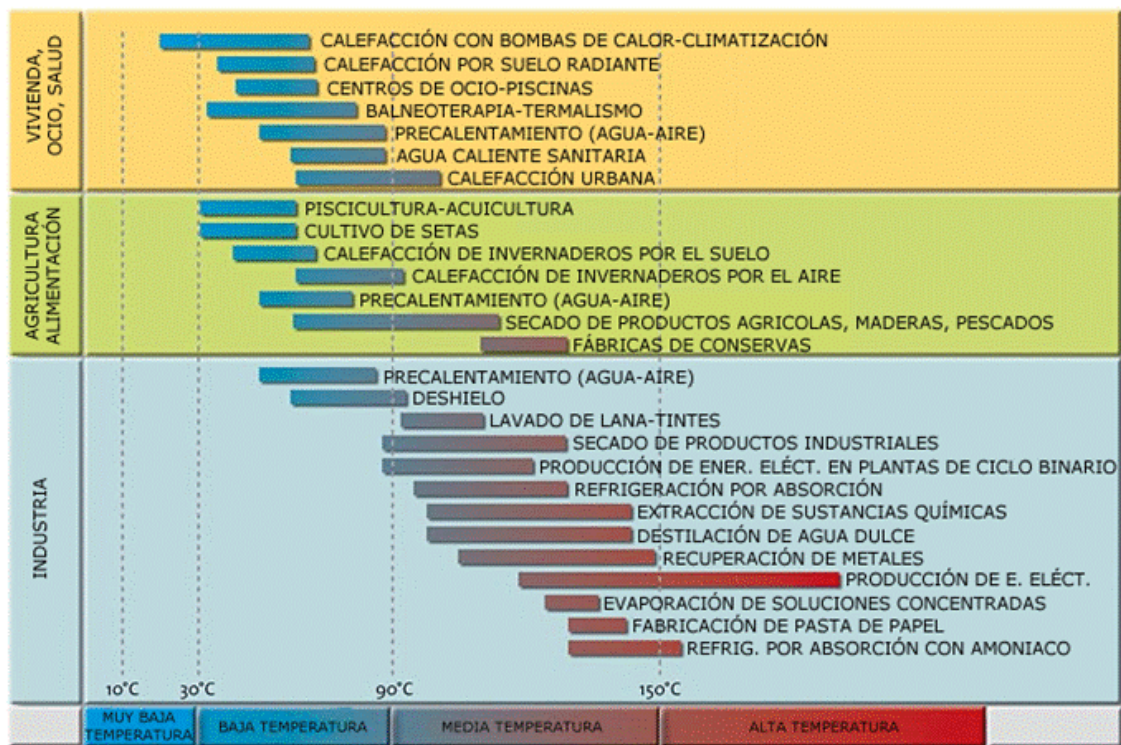
Otra gran ventaja de este tipo de sistemas es que las condiciones geológicas para su aprovechamiento son poco exigentes, por lo que prácticamente en cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de 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  $22^{\circ}\text{C}$ . (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° 6 muestra los potenciales usos de los diferentes fluidos geotermiales a diferentes temperaturas.

**Figura N° 6: Aplicación de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura**



Fuente: (Piedra Lara, 2011)

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

## 2.5. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO

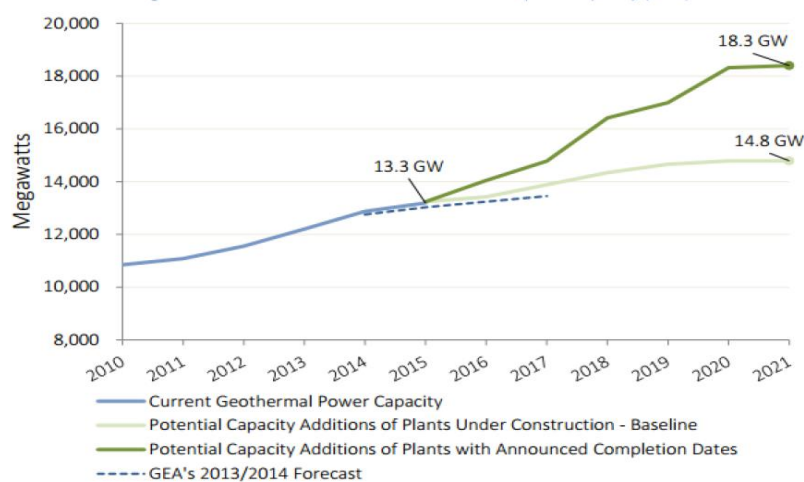
La energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas y se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor y ligada a

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 al 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.

**Figura N° 7: 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.

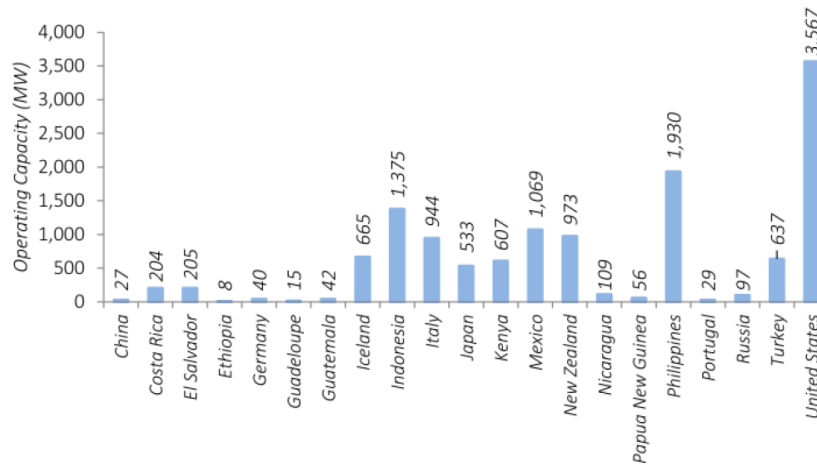
Se espera que en catorce de estos 82 países se pongan en marcha 2 GW de nueva potencia en los próximos 3-4 años en base a una lista de proyectos en construcción ligados a acuerdos de compra de energía a largo plazo (PPA). Según los últimos informes, se prevé que el mercado mundial llegue a los 18,4 GW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

### **2.5.1. 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 la figura 8, 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).

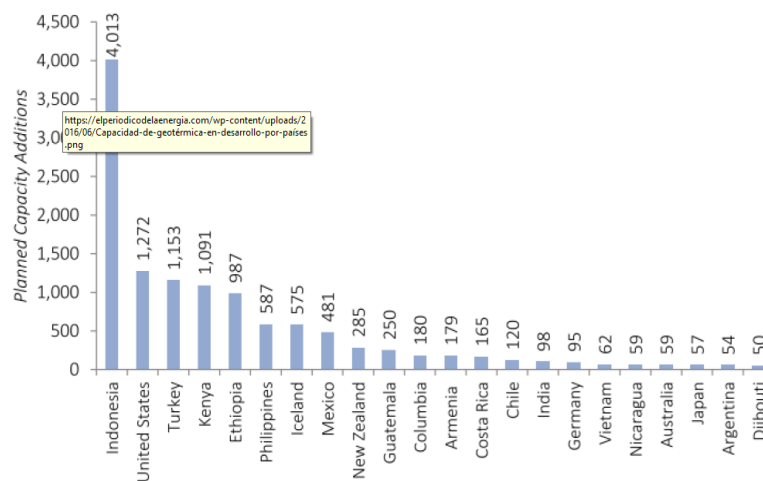
**Figura N° 8: Geothermal Power Operating Capacity by Country**



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° 9: 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° 10: 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 km<sup>2</sup>, 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.**

## 2. Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México

**Figura N° 11: 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° 12: 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° 13: 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° 14: 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° 15: 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° 16: 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 m<sup>2</sup>. 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° 17: 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° 18: 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° 19: 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.



## 2.6. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN AMÉRICA LATINA

Según el Instituto Geólogo y Metalúrgico (INGEMMET, 2014). 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° 1. 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 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)

**Tabla N° 1: Potencial geotérmico en América Central, el Caribe y América del Sur**

País	Capacidad geotermal instalada (Mwe)	Potencial geotérmica (Mwe)
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
Martica	-	3 500
México	751.88	6 510
Montserrat	-	940
Anfilas Holandesas	-	3 000
Nicaragua	70.00	3 340
Panamá	-	450
Perú	-	<b>2 900</b>
San Kits & Nevis	-	1 280
Santa Lucia	-	680
San Vicente & las Granadinas	-	890
Venezuela	-	910
Total	1 168.55	50 770

Fuente: (INGEMMET, 2014)

## 2.7 ENERGÍA GEOTÉRMICA EN PERÚ

Se han realizado los siguientes avances hasta la fecha:

- En 1975, la empresa estatal MINERO PERU efectuó estudios de exploración preliminar de las manifestaciones geotermales de Calacoa y Salinas en Moquegua.



- En 1976, Geothermal Energy Research del Japón, efectuó trabajos de exploraciones preliminares en la cuenca del Vilcanota en Cusco.
- En 1977, el INIE efectuó el primer censo de manifestaciones geotermales.
- En 1978, el INGEMMET elaboró un inventario y agrupación geográfica de afloramientos geotermales, se identificaron las siguientes regiones geotérmicas. (Córdova Zapata, 2007)
- Entre 1979 y 1980, con el apoyo de OLADE, la investigación geotérmica fue concentrada en la cordillera volcánica del sur de Perú, mediante estudios de reconocimiento llevados a cabo por la empresa italiana Aquater, en colaboración con el INGEMMET. En 1980 también la empresa Geothermal Energy Systems Ltd efectuó estudios en el sur de Perú, en las zonas de Calacoa, Salinas Grandes y Tutupaca. Entre 1982 y 1986 el reconocimiento geotérmico nacional fue extendido a la región noroeste del Perú, mediante un convenio de cooperación con el Gobierno de Italia, ejecutado por la generadora estatal Electro Perú con la participación de la empresa italiana CESEN.
- Paralelamente, entre 1983 y 1985, el INGEMMET amplió la investigación geotérmica nacional a la región de Puno-Cuzco, con el apoyo del Servicio Geológico Británico (Verastegui, 1988; Fidel, 2008; Cruz y Vargas, 2015).
- Durante la segunda mitad de los años '80 y los '90 la investigación geotérmica continuó principalmente enfocada en la cordillera volcánica del sur del Perú, donde los estudios anteriores parten realizados de forma independiente por el INGEMMET, Electro Perú (CENERGIA a partir de 1993139), y el Proyecto Especial Tacna del Gobierno Regional de Tacna, y en parte con el apoyo de organismos internacionales como: la OIEA en 1986, la CEPAL en 1997, Sandia National Laboratories en 1998, y el Instituto de Investigaciones Eléctricas de





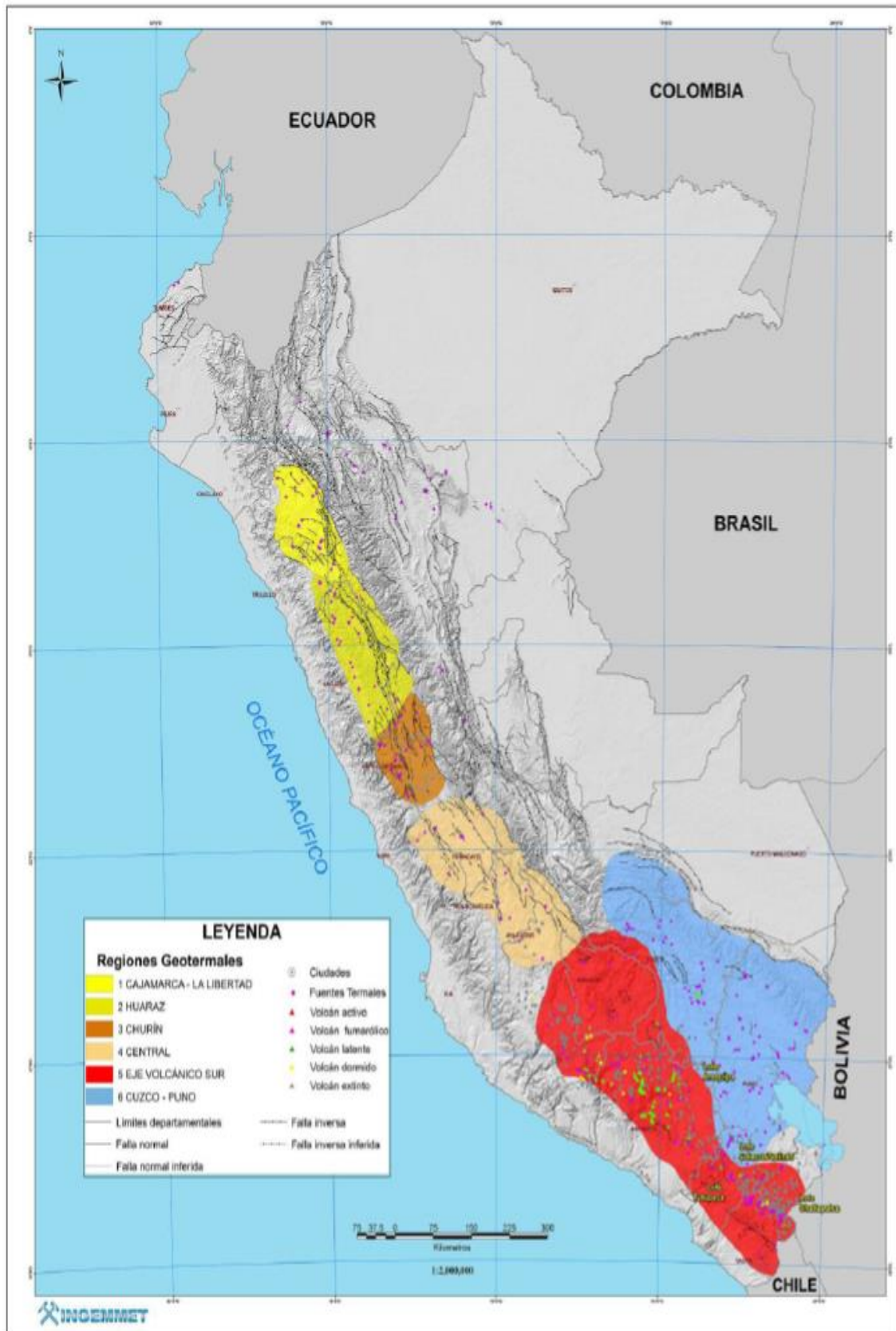
México (IIE) en 1996-1999. Estas actividades investigaron principalmente el sector comprendido entre los volcanes Tutupaca y Casiri en la Región de Tacna, y el Valle del Colca en la Región de Arequipa, pero el nivel de los estudios prácticamente no pasó del reconocimiento geológico y geoquímico (Battocletti y Lawrence, 1999; Fidel, 2008).

- Entre 1997 y 2003 el INGEMMET realizó un nuevo inventario nacional, con caracterización detallada de 537 manifestaciones termales y minerales, cuyos resultados fueron publicados en seis Boletines de la institución<sup>140</sup>. Luego, con toda la información recolectada durante más de 30 años de investigaciones, y por encargo del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), en el 2006 el INGEMMET inició a trabajar en un “Proyecto de Evaluación del Potencial Geotérmico del Perú, el cual produjo inicialmente un nuevo mapa geotérmico, publicado en el 2010 (Fidel, 2008; Vargas y Cruz, 2010, Vega, 2013).
- Con la iniciativa del Ministerio de Energía y Minas y el apoyo de la Cooperación Técnica Italiana (CTI) en la década de los ochenta se contrató a la empresa consultora CENERGIA para estudios preliminares de los recursos geotérmicos en nuestro país. (Córdova Zapata, 2007)
- A partir del 2007 el programa geotérmico de INGEMMET recibió apoyo del Gobierno del Japón. En 2007-2008, mediante la asistencia del Banco de Cooperación Internacional del Japón (JBIC), la atención fue concentrada en las áreas geotérmicas de Borateras y Calientes, en la cordillera volcánica del sur de Perú, donde la empresa japonesa West-Jec, en colaboración con el INGEMMET, llevó a cabo un programa de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas a nivel de prefactibilidad. (Bona & Coviello, 2016)



- Luego, en diciembre del 2009 el MINEM suscribió un acuerdo de cooperación técnica con JICA para la ejecución de estudios finalizados a la preparación de un “Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú”. El Plan Maestro fue completado en el 2012. Entre sus principales contenidos se encuentra una base de datos con recopilación de información sobre el recurso geotérmico a nivel nacional, la evaluación del potencial del recurso y la definición de una hoja de ruta para el desarrollo de la energía geotérmica en el país (Fidel, 2008; MINEM-JICA, 2012; Vega, 2013).
- A partir de 2010, y paralelamente a la ejecución del Plan Maestro, la emisión de un nuevo reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, movilizó a varias empresas privadas interesadas en explorar recursos geotérmicos en el país. Entre 2010 y 2012 el MINEM recibió numerosas solicitudes de autorización de exploración, muchas de las cuales correspondientes a lotes parcialmente sobrepuestos, de diferentes empresas en competición para áreas de particular interés geotérmico. El MINEM llegó a otorgar hasta 32 autorizaciones de exploración a 6 diferentes empresas, nacionales y extranjeras, pero el desarrollo geotérmico no ha tenido un avance sustancial y las autorizaciones vigentes se redujeron a 20 a finales del 2015 (Claros, 2014). La mayoría de las empresas no ha avanzado significativamente con los programas de exploración, en parte por falta de financiamiento y en parte por otros problemas, como han sido: aspectos regulatorios y administrativos, restricciones ambientales, temas sociales, y más en general la débil articulación entre los actores clave del sector (Muñoz et al., 2014; Vega, 2015).

Figura N° 20: Mapa geotérmico del Perú



Fuente: (INGEMMET, 2014)

El Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica completado en 2012 por MINEM-JICA provee la información más detallada disponible en cuanto a perspectivas de explotación del recurso geotérmico en el Perú. El estudio identificó 61 campos geotérmicos potenciales, cuatro de los cuales (Tutupaca, Calientes, Boratera, Ancoccollo) están caracterizados mediante estudios de superficie avanzados (geología, geoquímica y geofísica), 11 cuentan con estudios de reconocimiento geológico y geoquímico básicos, y otros 46 están identificados esencialmente por interpretación de características y distribución de manifestaciones termales. Con base en los datos proporcionados por (NINEM JICA, 2010)

La mayoría de las áreas seleccionadas se encuentra en el borde occidental del altiplano del sur de Perú a elevaciones superiores a los 4.000 m.s.n.m., por lo cual se caracterizan por condiciones territoriales y ambientales muy similares. Se trata de sitios rurales generalmente ubicados en sectores remotos, pero fácilmente accesibles mediante carreteras pavimentadas que cruzan el altiplano y caminos secundarios, generalmente en buenas condiciones. Todas las áreas se encuentran en territorios de comunidades indígenas Aymara o Quechua. (Bona & Coviello, 2016)

**Tabla N° 2: Lotes Geotérmicos identificados para la Explotación**

PROYECTOS PARA LA EXPLOTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A NIVEL DE ESTUDIO DE FACTIBILIDAD				
No.	LOTE GEOTÉRMICO	UBICACIÓN	TEMPERATURAS	BENEFICIO PROYECTO
1	TUTUPACA	Dpto. de Tacna y parte del Dpto. de Moquegua	SiO <sub>2</sub> : 180°C Na/K : 240°C SiO <sub>2</sub> : 110 - 160°C	* Cubrir la demanda de energía eléctrica Cujajone, Quellaveco y el Dpto. de Moquegua
2	CALACOA CHALLAPALCA	Sierra de Moquegua Altiplano de los departamentos de Tacna y parte de Puno	Na/K : 180 - 190°C SiO <sub>2</sub> : 192°C Na/K : 182 - 232°C Na/K/Ca : 184 - 212°C Na/K/Ca/Mg : 184 - 240°C Na/Li : 204 - 240°C K/Mg : 87 - 183°C	* Podría cubrir parcialmente los requerimientos del Sistema Eléctrico Tacna-Moquegua * Complejo Minero de Toquepala Ampliación de Cujajone * Ampliación de Quellaveco * Programas de desarrollo industrial de las futuras inversiones en la región
3	AREQUIPA	Departamento de Arequipa Lagunas Salinas - Chachani Laguna Chivay Laguna Callioma	SiO <sub>2</sub> : 170°C SiO <sub>2</sub> : 190°C	* Instalación de una planta geotérmica mediana (50 MW) * Potenciamiento del turismo en el Valle del Colca

Fuente: (ZAPATA, 2007)



## 2.8. TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS

A la fecha se han identificado cinco tipos de sistemas geotérmicos que se describen por algunas de sus características:

### 2.8.1. Sistemas hidrotermales

Estos sistemas están constituidos por: una fuente de calor, agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido. El agua de los sistemas hidrotermales se origina en la superficie de la tierra en forma de lluvia hielo o de nieve. Se infiltra lentamente en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando a varios kilómetros de profundidad en donde es calentada por la roca alcanzando en algunas ocasiones temperaturas de hasta 400°C. Estos sistemas se clasifican en:

#### a) Vapor dominante.

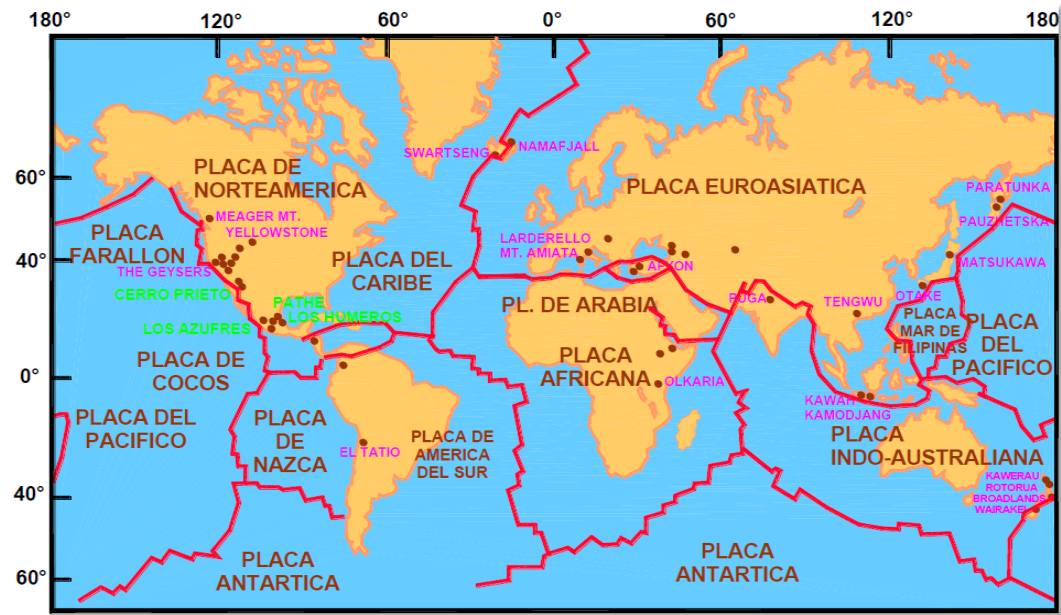
Son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco. Existen unos cuantos en el mundo. Los más conocidos son The Geysers (Estados Unidos) y Lardarello (Italia).

#### b) Líquido dominante (alta entalpía)

Sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200°C y más de 300°C. Son más abundantes que los anteriores. Ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).

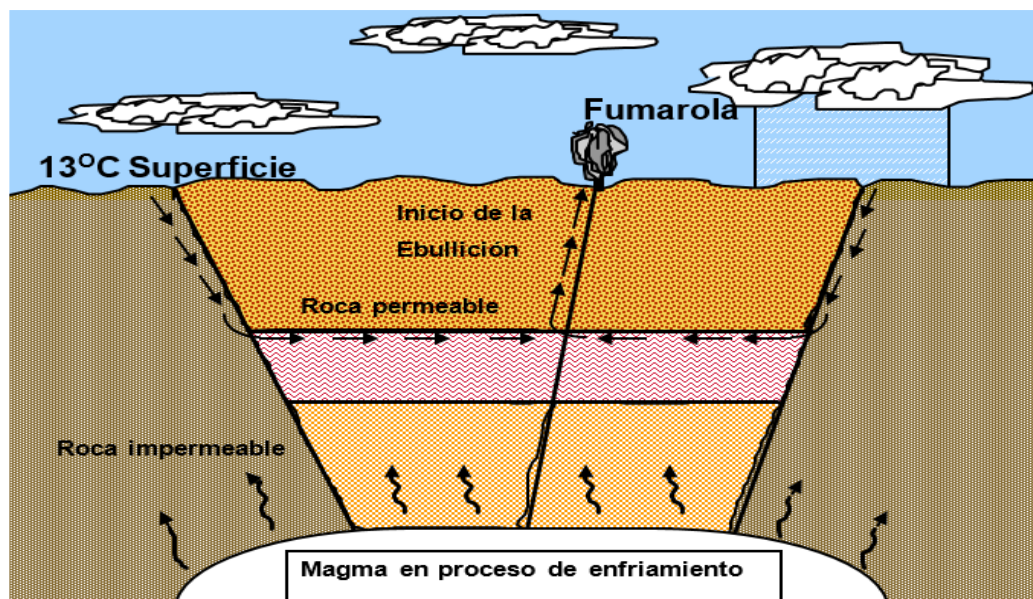
Sistemas con salmueras calientes, con temperaturas entre de 100°C y 200°C aproximadamente. Son más abundantes que los anteriores en una proporción de 10 a 1. Se encuentran en casi todos los países del mundo. Ejemplo: Heber (Estados Unidos), Yangbajin (China).

**Figura N° 21: Diagrama de las placas oceánicas y continentales**



Fuente: Centro de estudios Geotérmicos UNAM.

**Figura N° 22: Sistemas Hidrotermales**



Fuente: Centro de estudios Geotérmicos UNAM.

### 2.8.2. Sistemas de roca seca caliente

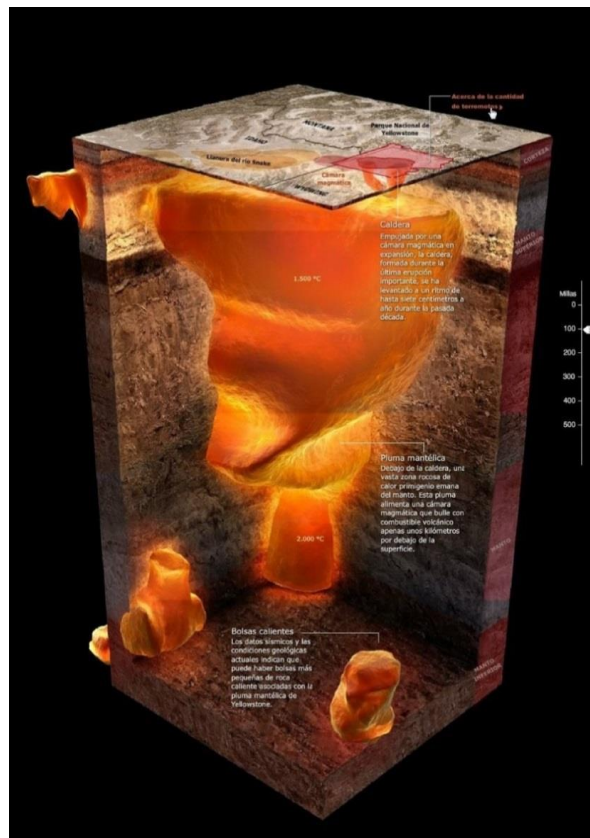
Son sistemas rocosos con alto contenido energético, pero con poca o ninguna agua, conocidos como HDR por sus siglas en inglés (Hot Dry Rock). No se explotan comercialmente en la actualidad. Ejemplo: Fenton Hill (Estados Unidos), Rosmanowes



(Reino Unido), Soultz-sous-Forêts (Francia). Este es probablemente uno de los recursos geotérmicos más abundantes. El U.S. Geological Survey ha estimado que la energía almacenada en los yacimientos de roca seca caliente que se encuentran dentro de los 10 kilómetros superiores de la corteza terrestre, equivale a más de 500 veces la energía acumulada en todos los yacimientos de gas y de petróleo del mundo, lo que habla de un recurso enorme.

Con el objetivo de explotar estos yacimientos se está desarrollando la tecnología necesaria para implementar el siguiente concepto. Se perfora un pozo hasta la profundidad en que se encuentra la formación de roca seca caliente de interés. Como esta roca es esencialmente impermeable, se crea un yacimiento artificial mediante fracturamiento hidráulico, una técnica muy utilizada por las industrias del gas y del petróleo. Posteriormente se perfora otro pozo, típicamente a algunos cientos de metros del primero, que intercepte la red de fracturas creada artificialmente. A continuación, se inyecta agua a presión en uno de los pozos. Al desplazarse por la red de fracturas, el agua se calienta por contacto con la roca de alta temperatura. El agua caliente se extrae por el pozo restante. En la actualidad los proyectos de investigación acerca de HDR más importantes se están llevando a cabo en la Comunidad Económica Europea (e.g., Baria et al., 2000) y en Japón (e.g., Kaieda et al., 2000).

**Figura N° 23: Sistema de Roca Seca Caliente**



Fuente: Centro de estudios Geotérmicos UNAM.

### 2.8.3. Sistemas geopresurizados

Son sistemas que contienen agua y metano disueltos a alta presión (del orden de 700 bar) y mediana temperatura (aproximadamente 150°C). No se explotan comercialmente en la actualidad. Ejemplo: yacimientos en Texas y Louisiana (Estados Unidos), y en Tamaulipas (México). Estos recursos ofrecen tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión). Algunos investigadores han estimado el potencial energético solamente en las costas de Texas en unos 40,000 MW (Alonso, 1993). Se desconoce el potencial de este recurso en México.

### 2.8.4. Sistemas marinos

Son sistemas de alta entalpía existentes en el fondo del mar. No se explotan comercialmente en la actualidad. Estos sistemas han sido poco estudiados hasta ahora. Ejemplo: Golfo de California (México).



Hace algunos años se efectuaron estudios preliminares en el Golfo de California (Mercado, 1990, 1993). Como parte de los estudios se incluyeron algunas inmersiones en un submarino. Esto permitió observar a 2600 metros de profundidad impresionantes chimeneas naturales descargando chorros de agua a 350°C. El flujo de calor medido en algunos puntos del Golfo de California es muy alto, de 0.34 W/m<sup>2</sup> (Suárez, 2000) mientras que en promedio el flujo natural de calor alcanza valores de entre 0.05 y 0.10 W/m<sup>2</sup>.

**Figura N° 24: Sistema Geotérmico Marino**



Fuente: Centro de estudios Geotérmicos UNAM.

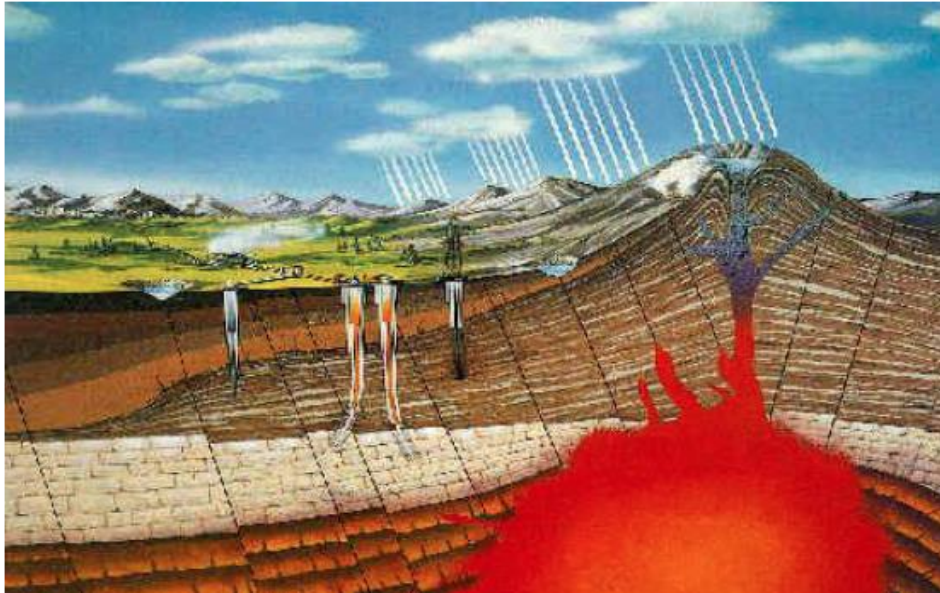
#### **2.8.5. Sistemas geotérmicos volcánicos.**

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. No se explotan comercialmente en la actualidad. Ejemplo: Volcán de Colima (México), Volcán Mauna Kea (Hawái).

Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles ( $\geq 800^{\circ}\text{C}$ ). Recordemos que la eficiencia de las máquinas térmicas es proporcional a la temperatura máxima de su ciclo termodinámico.

En el mediano o largo plazo, cuando se cuente con la tecnología y los materiales adecuados para resistir la corrosión y las altas temperaturas se podrá explotar la enorme cantidad de energía almacenada en las cámaras magmáticas de los volcanes activos.

**Figura N° 25: Sistema Geotérmico Volcánico**



Fuente: Centro de estudios Geotérmicos UNAM.

## **2.9. TIPOS DE 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:

### **2.9.1. Yacimientos de muy baja temperatura (menos de 30°C)**

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)

**Tabla N° 3: Clasificación de los recursos geotérmicos en base a la temperatura**

	<i>Muffler &amp; Cataldi,</i> 1978	<i>Hochstein,</i> 1990	<i>Benderitter &amp; Cory,</i> 1990	<i>Haenel, Rybach &amp; Stegena, 1988</i>
Baja entalpía	< 90°C	< 125°C	< 100°C	< 150°C
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)

### 2.9.2. Yacimientos de baja temperatura (entre 30°C y 90°C)

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)

### 2.9.3. Yacimientos de media temperatura (entre 90°C y 150°C)

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)

### 2.9.4. Yacimientos de alta temperatura (más de 150°C)

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 elevada, 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)

## **2.10. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA**

Actualmente los recursos geotérmicos no solamente son susceptibles de ser aprovechados en la generación de electricidad, sino también en una gran variedad de actividades agrupadas bajo el nombre genérico de usos directos. Entre los mismos se pueden mencionar los siguientes: calefacción (Islandia, Estados Unidos, Nueva Zelanda), procesado de alimentos (Estados Unidos y Filipinas), lavado y secado de lana (China y Nueva Zelanda), fermentación (Japón), industria papelera (Australia, China y Nueva Zelanda), producción de ácido sulfúrico (Nueva Zelanda), manufactura de cemento (Islandia y China), teñido de telas (Japón), etc.

### **2.10.1. Procesos industriales:**

Las diferentes formas de utilización de este calor incluyen procesos de calefacción, evaporación, secado, esterilización, destilación, lavado, descongelamiento y extracción de sales, etc., aplicado en la industria de producción de papel y reciclado, procesamiento de celulosa, tratamientos textiles, industria alimenticia, pasteurización de leche, extracción de productos químicos, recuperación de productos petrolíferos, extracción de CO<sub>2</sub>, bebidas carbonatadas, etc.

### **2.10.2. Invernaderos**

Un empleo muy común de la energía geotérmica de baja temperatura es en agricultura. Las aplicaciones agrícolas de fluidos geotermales son para calefacción a campo abierto e invernaderos. El uso de invernaderos no se limita sólo a cultivos vegetales comestibles sino al cultivo de plantas ornamentales, flores, etc.



### **2.10.3. Acuicultura**

La acuicultura es la técnica controlada de especies acuáticas vegetales y animales que, actualmente, está adquiriendo gran importancia a nivel mundial. El nivel térmico exigido por las piscifactorías permite el aprovechamiento de los yacimientos de baja temperatura y constituye un campo de aplicación muy interesante para el aprovechamiento de aguas geotermales, principalmente en países fríos.

### **2.10.4. Sector residencial y servicios**

La demanda térmica de la energía consumida en el sector residencial y de servicios es relativamente baja, lo que permite utilizar agua geotérmica de baja entalpía y devolverla a baja temperatura, incrementando así el potencial geotérmico del recurso e induciendo a un ahorro de energía.

### **2.10.5. Generación de electricidad**

Los yacimientos geotérmicos de alta temperatura pueden aprovecharse para generar electricidad mediante un ciclo similar al utilizado en las centrales termoeléctricas convencionales. Dependiendo de las características del recurso geotérmico, la generación de electricidad se realiza mediante turbinas de vapor convencionales (Ciclo Rankine) y plantas de ciclo binario. La utilización de los recursos geotérmicos, como fuente de energía primaria para la generación de electricidad, es una de las aplicaciones más importantes, cuando la temperatura del fluido es alta o muy alta. Ahora bien, a medida que disminuye el nivel térmico del recurso aumenta el consumo específico de la central de generación, disminuyendo su rendimiento neto rápidamente.

**Figura N° 26: Lindegus – Florida, Industria Cementera**



Fuente: International Geothermal Association (IGA)

**Figura N° 27: Invernaderos geotérmicos**



Fuente: Meteorología en red

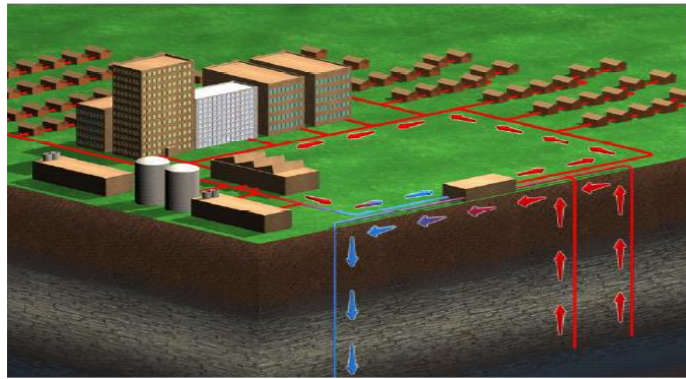
**Figura N° 28: Criadero piscícola climatizado con agua geotérmica en Imperial**

**Valley, California, EE.UU**



Fuente: Geothermal Education Office

**Figura N° 29: Sistema de Calefacción Distrital con Fuentes Geotermales**



Fuente: International Geothermal Association (IGA)

## **2.11. TIPOS DE PLANTAS GEOTÉRMICAS**

### **2.11.1. Plantas tipo Vapor Directo**

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. (UPME, 2003)

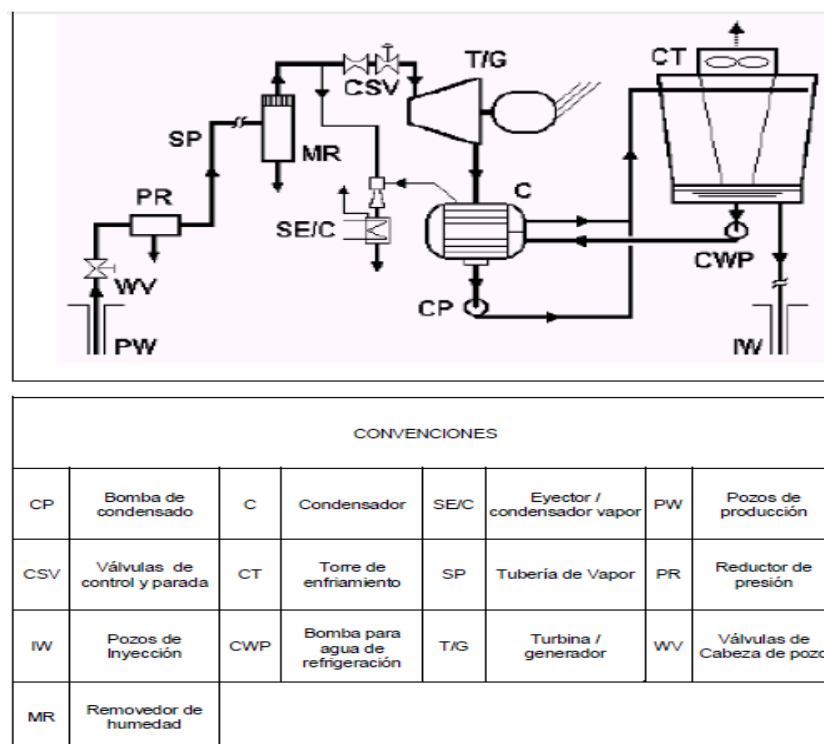
El vapor es llevado de varios pozos a través de una tubería a la casa de máquinas donde es usado directamente en turbinas tipo impulso/reacción. Entre la boca del yacimiento y la planta existen separadores centrífugos situados cerca del yacimiento para remover partículas tales como polvo y sólidos tales como pedazos de la piedra; a lo largo de la tubería se instalan 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. (UPME, 2003)

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). (UPME, 2003)

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. (UPME, 2003)

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. (UPME, 2003)

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



Fuente: (R. DiPippo, 2008)

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% de 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. (UPME, 2003)

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. (UPME, 2003)

### **2.11.2. Plantas tipo “Flash Steam”**

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 significativamente en la densidad ( $r_f/r_g=175-350$ ) 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. (UPME, 2003)

### **2.11.3. Plantas tipo “Single Flash”**

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 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 reinyectado 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)



### 2.11.5. 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)

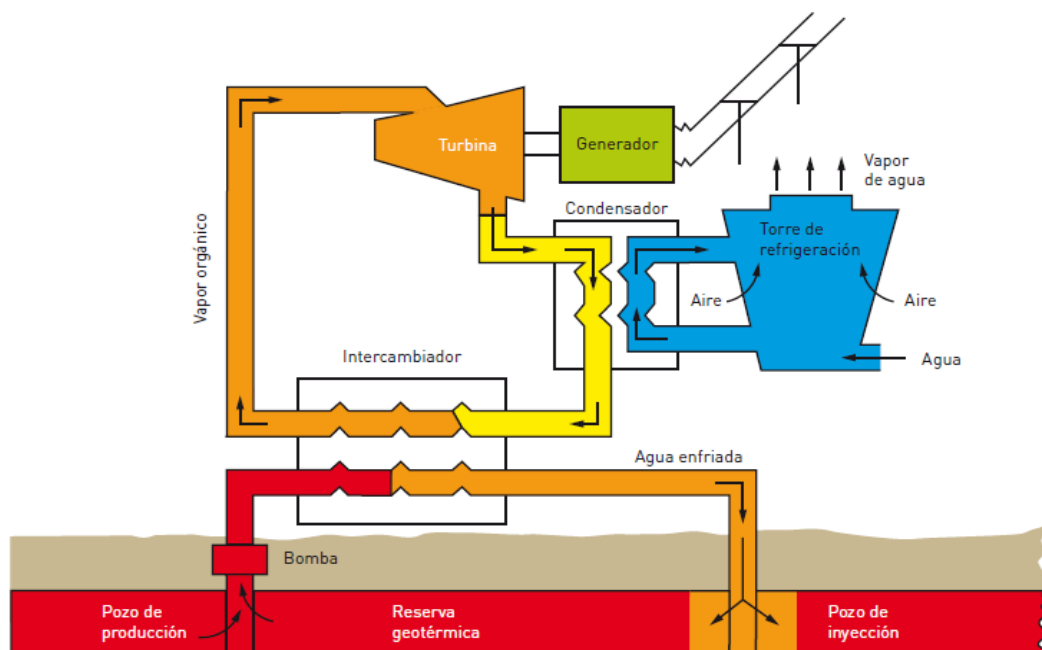
El vapor resultante acciona la turbina y, posteriormente, se condensa en un condensador de aire o agua y se bombea de nuevo al intercambiador, donde vuelve a vaporizarse. El fluido secundario, por tanto, se encuentra en un circuito cerrado. El esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario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

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



Fuente: (IDAE, 2011)

#### 2.11.5.1. Ciclo Rankine Orgánico (ORC)

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)

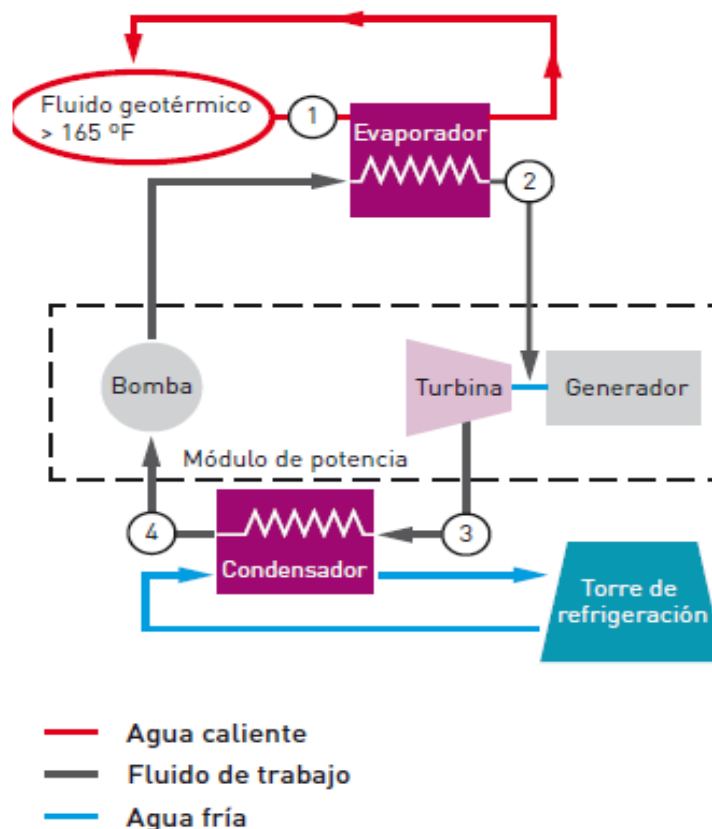
Las plantas eléctricas ORC utilizan como fluido secundario uno de naturaleza orgánica (normalmente, un hidrocarburo, como propano, butano o isopentano), cuya selección depende, fundamentalmente, de la temperatura de la salmuera geotérmica. El ciclo de Rankine incluye cuatro procesos que cambian el estado 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.

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)

### 2.11.5.2. 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. 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.

**Figura N° 35: Equipo principal de plantas geotérmicas**

Equipo	tipo de sistema			
	Dry steam	Single flash	Double Flash	Basic Binary
suministro vapor o salmuera				
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)



## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

La provincia de San Antonio de Putina es una de las trece que conforman el departamento de Puno, bajo la administración del Gobierno Regional de Puno en el Perú. Limita por el norte con la Provincia de Carabaya y la Provincia de Sandia; por el este con Bolivia; por el sur con la Provincia de Huancané y; por el oeste con la Provincia de Azángaro.

**Figura N° 36: Ubicación geográfica**



Fuente: Google Earth Pro

**Tabla N° 4: Coordenadas geográficas**

Coordenadas		Sistema	Cota (msnm)
Norte	Este	WGS-84	3875
8351234.5	406831.61		

Fuente: Google Earth Pro

### 3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

El presente trabajo de tesis fue desarrollado en la ciudad de Putina, en la región de Puno. El periodo programado fue durante los meses de julio y agosto del año 2019, tomando en cuenta que la primera parte del estudio es determinar un análisis con las condiciones actuales de temperatura de esta parte de la región de Puno, obteniendo una temperatura geotermal promedio de 52°C.

### 3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO

#### 3.3.1. Materiales

a) Termómetro digital

Este instrumento nos permitió tomar las medidas de temperatura durante todo el proceso de toma de datos en las aguas termales de la ciudad de Putina.

Marca : BOECO GERMANY

Modelo : TERMOHIGROMETRO SH-110

Especificaciones técnicas

Temperatura : -50°C a +70°C

Precisión :  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\%$  RH

**Figura N° 37: Termómetro digital**



Elaboración propia

b) Gps

Equipo que se nos permitió recopilar datos de la ubicación del punto de estudio.

Marca : Garmin

Modelo : GPS Garmin Map 64s

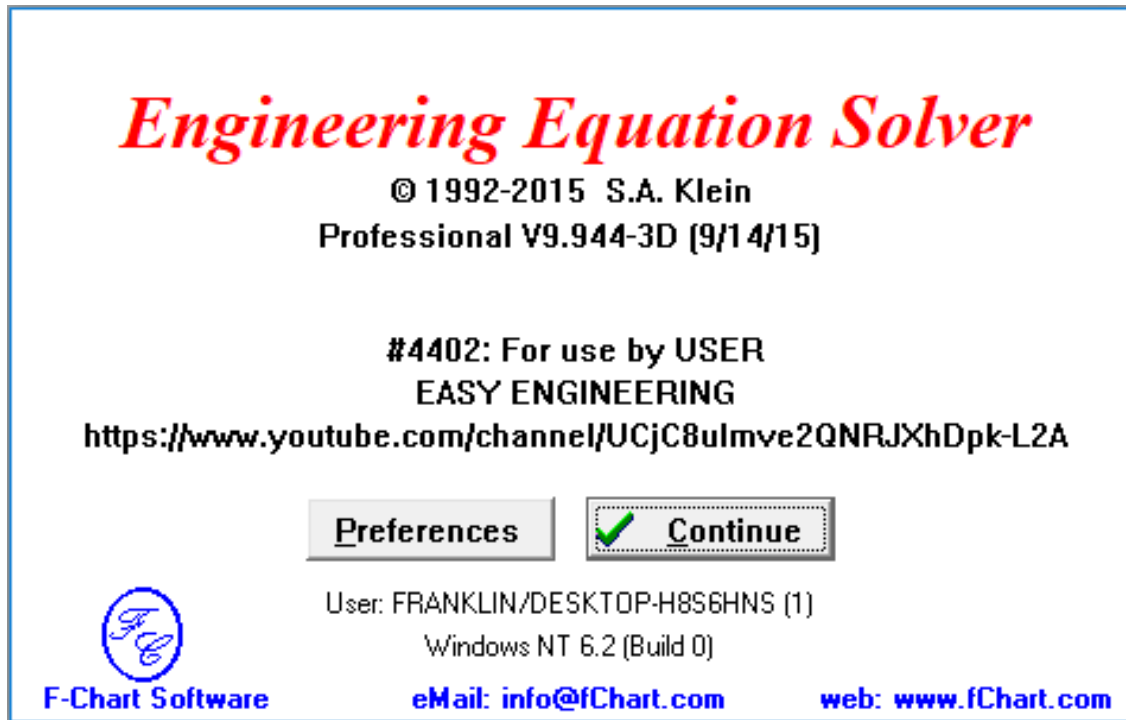
**Figura N° 38: GPS Garmin**



Elaboración propia

c) EES Profesional (V9.944-3D)

**Figura N° 39: EES Profesional**



Fuente: EES

- d) Microsoft Excel
- e) Microsoft Word
- f) Google Earth Pro

### **3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO**

La presente Tesis ha sido aplicado a un lugar específico, donde la población es la misma que la muestra y las aguas termales de baja entalpía, del yacimiento geotérmico de la ciudad de Putina en el departamento de Puno.

### **3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO**

El diseño estadístico es un factor esencial para la evaluación de impacto. Este permite definir el esquema de muestreo, el diseño de la muestra, la selección y la forma de ampliar los resultados obtenidos en una muestra al conjunto del universo de predios estudiados (los factores de expansión).



**Tabla N° 5: Cuadro de temperatura – julio 2019**

CUADRO DE TEMPERATURA - JULIO 2019								
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
01/07/2019	12:00	52.5	03/07/2019	8:00	52.3	05/07/2019	16:00	51.8
	12:15	51.1		8:15	52.4		16:15	52.6
	12:30	51.0		8:30	52.1		16:30	52.3
	13:00	51.8		9:00	52.4		16:45	52.4
PROMEDIO		<b>51.6</b>	PROMEDIO		<b>52.3</b>	PROMEDIO		<b>52.3</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
08/07/2019	12:00	52.0	10/07/2019	6:00	52.1	12/07/2019	10:30	52.6
	12:15	51.9		6:15	52.4		10:45	52.6
	12:30	52.4		6:30	52.4		11:00	52.4
	12:45	50.9		6:45	52.0		11:15	51.8
PROMEDIO		<b>51.8</b>	PROMEDIO		<b>52.2</b>	PROMEDIO		<b>52.4</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
15/07/2019	6:15	52.0	17/07/2019	5:30	51.9	19/07/2019	13:15	52.4
	6:30	52.5		5:45	52.0		13:30	52.3
	6:45	52.0		6:00	52.3		13:45	52.6
	7:00	52.8		6:15	52.1		14:00	51.8
PROMEDIO		<b>52.3</b>	PROMEDIO		<b>52.1</b>	PROMEDIO		<b>52.3</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
22/07/2019	12:00	52.1	24/07/2019	9:15	51.8	26/07/2019	16:00	51.5
	12:15	50.0		9:30	51.6		16:15	51.5
	12:30	52.8		9:45	51.9		16:30	51.6
	15:45	52.1		10:00	52.0		16:45	51.6
PROMEDIO		<b>51.8</b>	PROMEDIO		<b>51.8</b>	PROMEDIO		<b>51.6</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA			
	Hora	°C		Hora	°C			
29/07/2019	7:00	52.0	31/07/2019	4:45	51.8			
	7:15	52.0		5:00	51.8			
	7:30	52.1		5:15	51.9			
	7:45	52.0		5:30	52.0			
PROMEDIO		<b>52.0</b>	PROMEDIO		<b>51.9</b>			

Elaboración propia

**Tabla N° 6: Resultados de temperaturas julio 2019**

JULIO 2019	
TEMPERATURA MINIMA	50.0
TEMPERATURA MAXIMA	52.8
TEMPERATURA PROMEDIO	52.0

Elaboración propia



**Tabla N° 7: Cuadro de temperatura – agosto 2019**

CUADRO DE TEMPERATURA - AGOSTO 2019								
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
02/08/2019	7:00	52.0	05/08/2019	13:15	52.4	07/08/2019	12:00	52.0
	7:15	52.0		13:30	52.3		12:15	51.9
	7:30	52.1		13:45	52.6		12:30	52.4
	7:45	52.0		14:00	51.8		12:45	50.9
PROMEDIO		<b>52.0</b>	PROMEDIO		<b>52.3</b>	PROMEDIO		<b>51.8</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
09/08/2019	4:45	51.8	12/08/2019	5:30	51.9	14/08/2019	16:00	51.8
	5:00	51.8		5:45	52.0		16:15	52.6
	5:15	51.9		6:00	52.3		16:30	52.3
	5:30	52.0		6:15	52.1		16:45	52.4
PROMEDIO		<b>51.9</b>	PROMEDIO		<b>52.1</b>	PROMEDIO		<b>52.3</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
16/08/2019	16:00	51.5	19/08/2019	6:15	52.5	21/08/2019	8:00	52.3
	16:15	51.5		6:30	52.5		8:15	52.4
	16:30	51.6		6:45	52.5		8:30	52.1
	16:45	51.6		7:00	52.4		9:00	52.4
PROMEDIO		<b>51.6</b>	PROMEDIO		<b>52.5</b>	PROMEDIO		<b>52.3</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA	FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA
	Hora	°C		Hora	°C		Hora	°C
23/08/2019	9:15	51.8	26/08/2019	10:30	52.2	28/08/2019	12:00	52.5
	9:30	51.6		10:45	52.1		12:15	51.1
	9:45	51.9		11:00	52.4		12:30	51.0
	10:00	52.0		11:15	51.8		13:00	51.8
PROMEDIO		<b>51.8</b>	PROMEDIO		<b>52.1</b>	PROMEDIO		<b>51.6</b>
FECHA	TIEMPO	TEMPERATURA						
	Hora	°C						
30/08/2019	12:00	52.0						
	12:15	52.1						
	12:30	52.8						
	15:45	52.4						
PROMEDIO		<b>52.3</b>						

Elaboración propia

**Tabla N° 8: Resultados de temperaturas agosto 2019**

AGOSTO 2019	
TEMPERATURA MINIMA	50.9
TEMPERATURA MAXIMA	52.8
TEMPERATURA PROMEDIO	52.0

Elaboración propia



### **3.6. PROCEDIMIENTO**

#### **3.6.1. 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.

#### **3.6.2. Fase de campo.**

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

#### **3.6.3. Base de datos.**

Los datos de coordenadas de las fuentes termales, temperatura, pH, son almacenados en la base de datos del software Microsoft Excel.

#### **3.6.4. Análisis de datos.**

Los datos de laboratorio son puestos a prueba de geotermómetro de sílice vs entalpía, 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.

### **3.7. VARIABLES**

#### **3.7.1. Formulación de las variables**

##### **3.7.1.1. Variables independientes**

Temperatura de la fuente geotermal.

##### **3.7.1.2. Variables dependientes**

Potencia de generación eléctrica

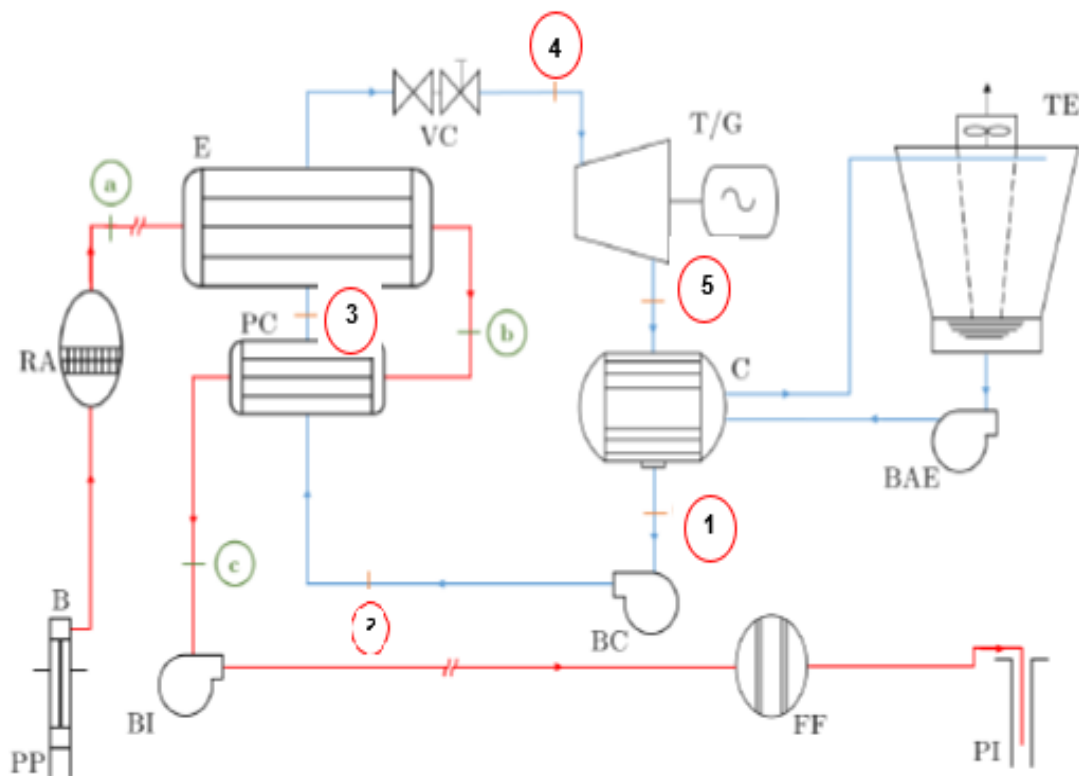
### **3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el presente trabajo de tesis, se dará mayor impulso al uso de los recursos energéticos renovables, en especial al recurso geotérmico de baja 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 baja 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° 40.

**Figura N° 40: Planta geotérmica binaria propuesta**



Fuente: (Matamala Aviles, 2014)



### 3.8.1. 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 9 muestra los componentes de una planta de ciclo binario.

**Tabla N° 9: Componentes de una planta de ciclo binario**

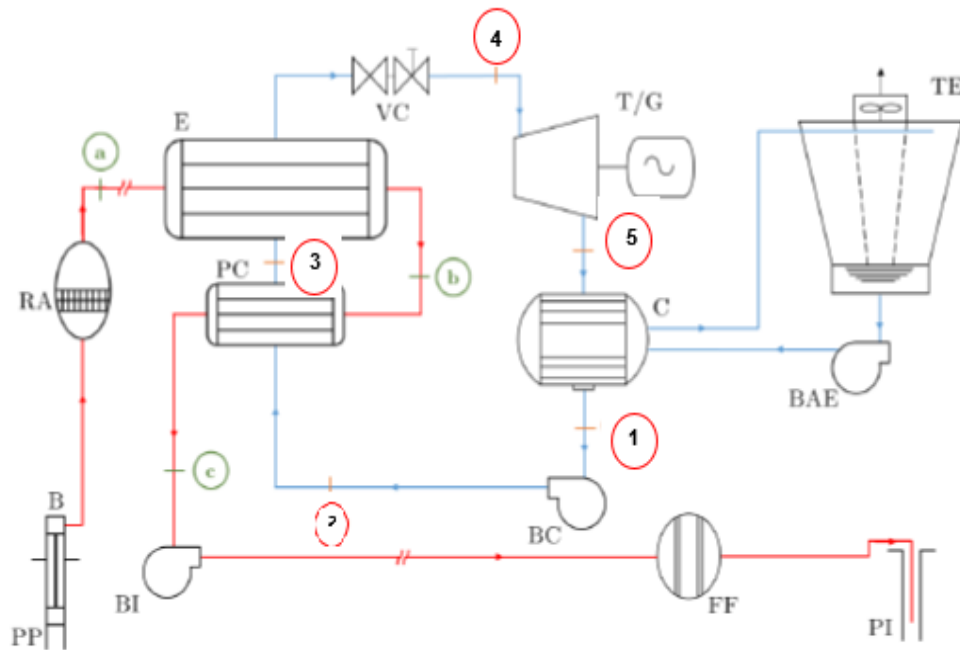
SISTEMA	SUBSISTEMAS	COMPONENTES
Planta Geotérmica binaria	Suministro del fluido geotérmico	Bombas centrífugas multietapa con eje lineal accionado por motores montados en la superficie, o bombas sumergibles, tuberías y sistema de remoción de arena
	Sistema de alimentación de fluido de trabajo	Bomba y 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)

### 3.8.2. Cálculos

En la figura 41 se observa el esquema de la planta geotérmica binaria con un precalentador y evaporador y una potencia instalada de 4,5 MW. En rojo se muestra el ciclo primario del fluido geotérmico, y en azul el ciclo secundario del fluido de trabajo.

**Figura N° 41: Esquema de la central de ciclo binario**



Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

B: Bomba

PP: Pozo de Producción

RA: Removedor de Arena

FF: Filtro Final

PC: Precalentador

E: Evaporador

VC: Válvula de Control

T/G: Turbina/Generador

BC: Bomba de Condensado

BI: Bomba de Inyección

PI: Pozo de Inyección

BAE: Bomba de Agua de Enfriamiento

TE: Torre de Enfriamiento

C: Condensador

### a) Proceso de intercambio de calor: Precalentador y Evaporador

Referente al análisis del intercambio de calor en un Ciclo Binario, donde el fluido geotermal cederá parte de su energía al fluido de trabajo, para lo cual es necesario usar los principios de la termodinámica y la conservación de la masa. Asumiendo que el sistema es adiabático, es decir que el traspaso de calor ocurre solo desde el fluido geotermal al fluido de trabajo y que hay un flujo estable. Como resultado tenemos la ecuación de balance:

$$\dot{m}_{FT}(h_a - h_c) = \dot{m}_{FT}(h_4 - h_2) \dots (1)$$

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

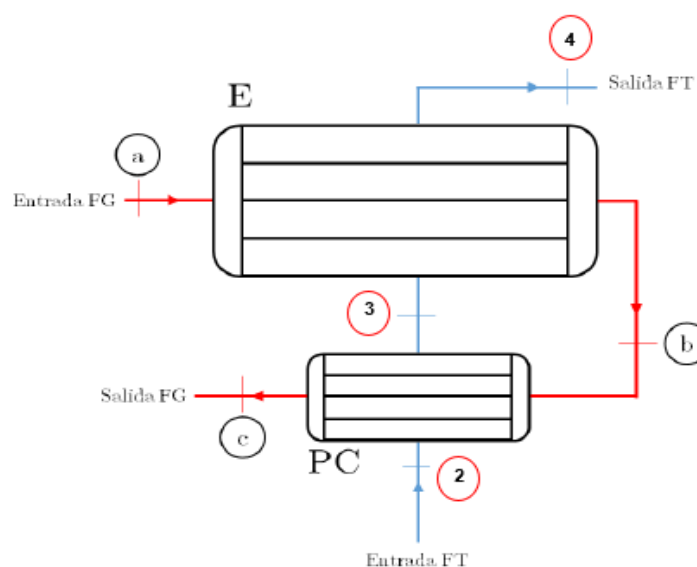
$\dot{m}_{FT}$  = Flujo másico del fluido de trabajo

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

$$\dot{m}_{FT} \cdot c_{FG}(T_a - T_c) = \dot{m}_{FT}(h_4 - h_2) \dots (2)$$

$c_{FG}$  = Calor específico del fluido geotérmico

**Figura N° 42: Evaporador y precalentador**

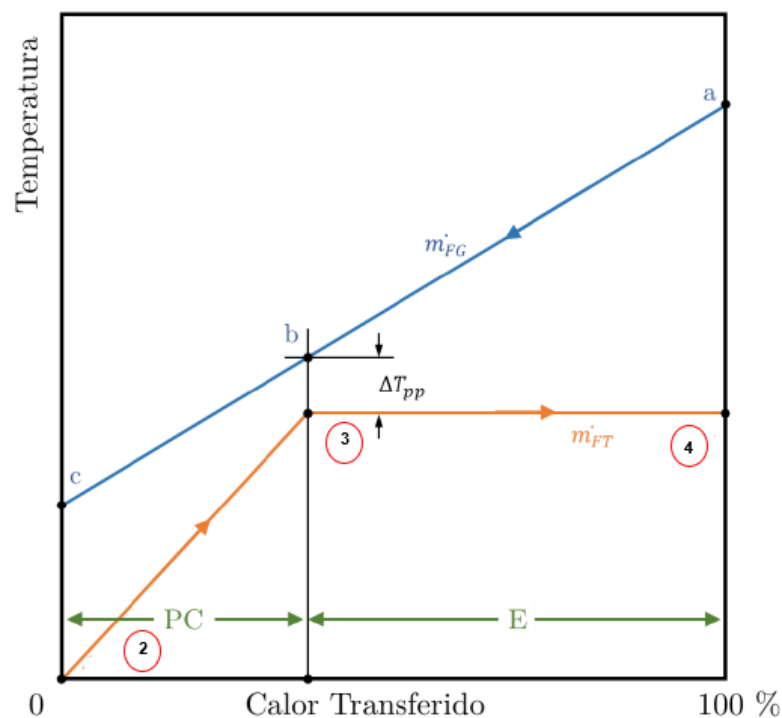


Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

El proceso de intercambio de calor entre el fluido geotermal y el fluido de trabajo se representa en la figura 43. La línea de color naranja representa al fluido de trabajo y la línea azul al fluido geotérmico.

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  $\Delta T_{pp}$ .

**Figura N° 43: Diagrama Temperatura vs Calor transferido para precalentador y evaporador**



Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

Para la obtención de los puntos o estados 2, 3 y 4 es necesario conocer las especificaciones del ciclo, es decir, respecto al 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:

$$\dot{m}_{FG} \cdot c_{FG}(T_a - T_b) = \dot{m}_{FT} (h_4 - h_3) \dots (3)$$

Pre calentador:

$$\dot{m}_{FG} \cdot c_{FG}(T_b - T_c) = \dot{m}_{FT} (h_3 - h_2) \dots (4)$$

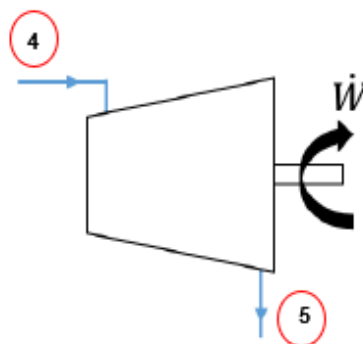
La temperatura del fluido geotérmico que ingresa al evaporador  $T_a$  se asume siempre conocida, mientras que la temperatura pinch la entrega cada fabricante de intercambiador.

### b) Proceso de expansión en la turbina

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:

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

**Figura N° 44: Esquema simplificado de una turbina**



Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

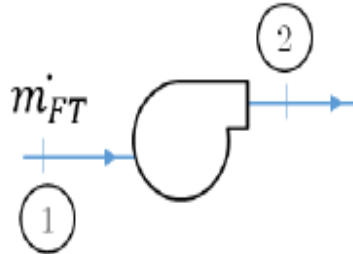
### c) Proceso de bombeo

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:

$$Wb = (h2 - h1) \dots (6)$$

$$\dot{W}t = \dot{m}_{FT}(h2 - h1) = \frac{\dot{m}_{FT}(h2, s - h1)}{nb} \dots (7)$$

Figura N° 45: Esquema simplificado de una bomba



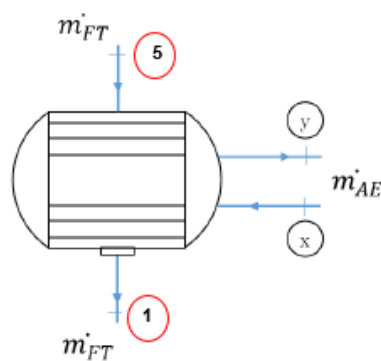
Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

#### 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  $m_{AE}$  y el fluido de trabajo se muestra a continuación:

$$\dot{m}_{AE}(h_y - h_x) = \dot{m}_{FT}nt(h5 - h1) \dots (8)$$

Figura N° 46: Esquema simplificado de un condensador de superficie



Fuente: (Matamala Aviles, 2014)

#### 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:



$$We = (Wt - Wb) \cdot nm \cdot ng \dots (9)$$

$$We = [(h4 - h5) - (h2 - h1)] \cdot mFT \cdot nt \cdot nm \cdot ng \dots (10)$$

$nt$  = eficiencia de la turbina

$nm$  = eficiencia mecánica

$ng$  = 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.

$$nth = \frac{We}{QFT} \dots (11)$$

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

$$nth = \frac{\dot{m}FT(h4 - h5)}{\dot{m}FT(h4 - h2)} \dots (12)$$

#### g) Fluido de trabajo

A continuación, se muestra la Tabla 10 con los fluidos típicos usados como fluido de trabajo en centrales de ciclo binario junto con sus propiedades más relevantes:



**Tabla N° 10: Propiedades Termodinámicas de algunos fluidos de trabajo**

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

Fuente: (Matamala Aviles, 2014)



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS

##### 4.1.1. Análisis con los datos actuales de Putina

En primera instancia se hace un cálculo con los datos que se tiene actualmente los cuales son la temperatura del fluido geotérmico de 52°C y un flujo másico de 10 kg/s, con los siguientes flujos de trabajo: amoniaco, butano, isobutano y R134a a continuación se muestran los resultados:

##### 4.1.1. Amoniaco

**Tabla N° 11: Parámetros iniciales para Amoniaco**

PARÁMETROS INICIALES			
Pa	1	Bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	52	°C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	7.289	Bar	Presión a la salida de la turbina
P2	12	Bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	15	°C	Temperatura de condensación
<i>Ngen</i>	0.96	%	Eficiencia del generador
<i>Nm</i>	0.87	%	Eficiencia mecánica
<i>Nt</i>	0.88	%	Eficiencia de la turbina
<i>Nb</i>	0.9	%	Eficiencia de la bomba
$\Delta T_{pp}$	5	°C	Temperatura Pinch Point
<i>Tx</i>	15	°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
<i>mAE</i>	70	kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
$\Delta P_{x-y}$	0.5	Bar	Pérdida de presión en el condensador
<i>Px</i>	1	Bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
<i>mFG</i>	10	kg/s	Flujo másico del fluido geotérmico

Elaboración propia



**Tabla N° 12: Resultados de la planta geotérmica binaria para Amoniaco**

<b>PUNTO N°</b>	<b>Hi Kj/Kg</b>	<b>Pi Bar</b>	<b>Si KJ/Kg.K</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Xi</b>	<b>Vi m<sup>3</sup>/Kg</b>
1	270.2	7.289	1.247	15	-100	0.001619
2	270.7	12	1.248	15.08	-100	0.001619
3	346.1	12	1.502	30.93	0	0.001684
4	1487	12	5.253	30.93	1	0.1075
5	1432	7.289	5.279	15	0.9629	0.1681
A	217.8	1	0.7295	52	-100	0.001013
B	150.5	0.05923	0.5176	35.93	0	0.001006
C	146	0.05586	0.5032	34.87	0	0.001006
X	63.01	1	0.2242	15	-100	0.001001
Y	72.79	0.5	0.2582	17.35	-100	0.001001

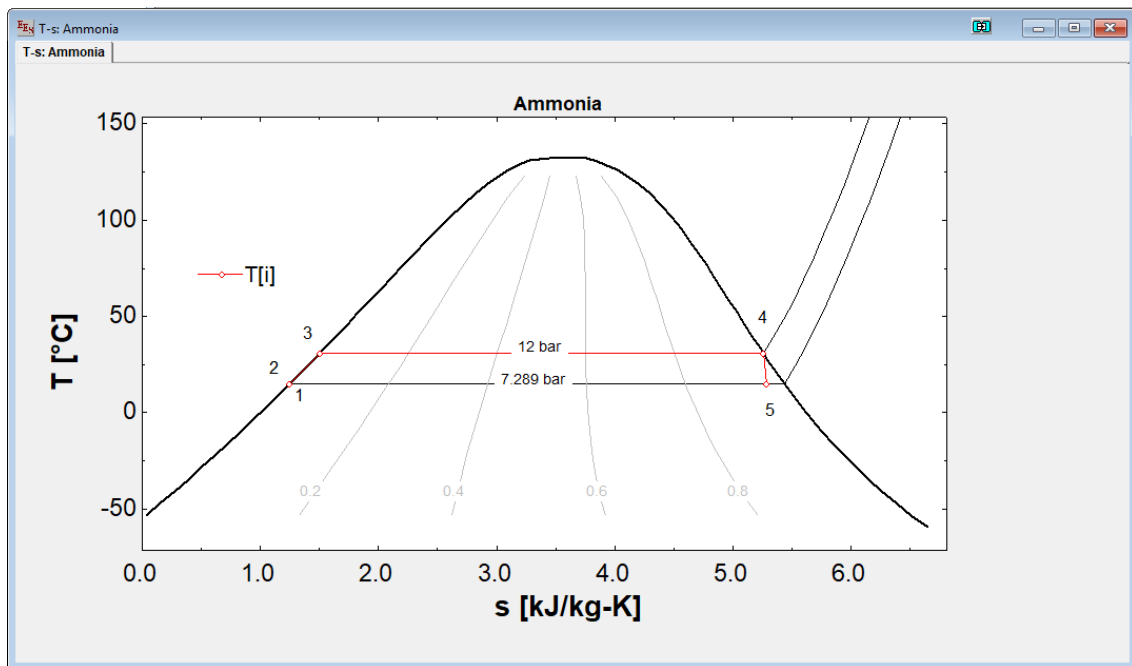
Elaboración propia

**Tabla N° 13: Características de la central geotérmica binaria para Amoniaco**

<b>AMONIACO</b>		
Potencia de generación	KW	26.81
Flujo másico geotermal	Kg/s	10
Flujo másico del fluido de trabajo	Kg/s	0.5892
Eficiencia térmica	%	3.742

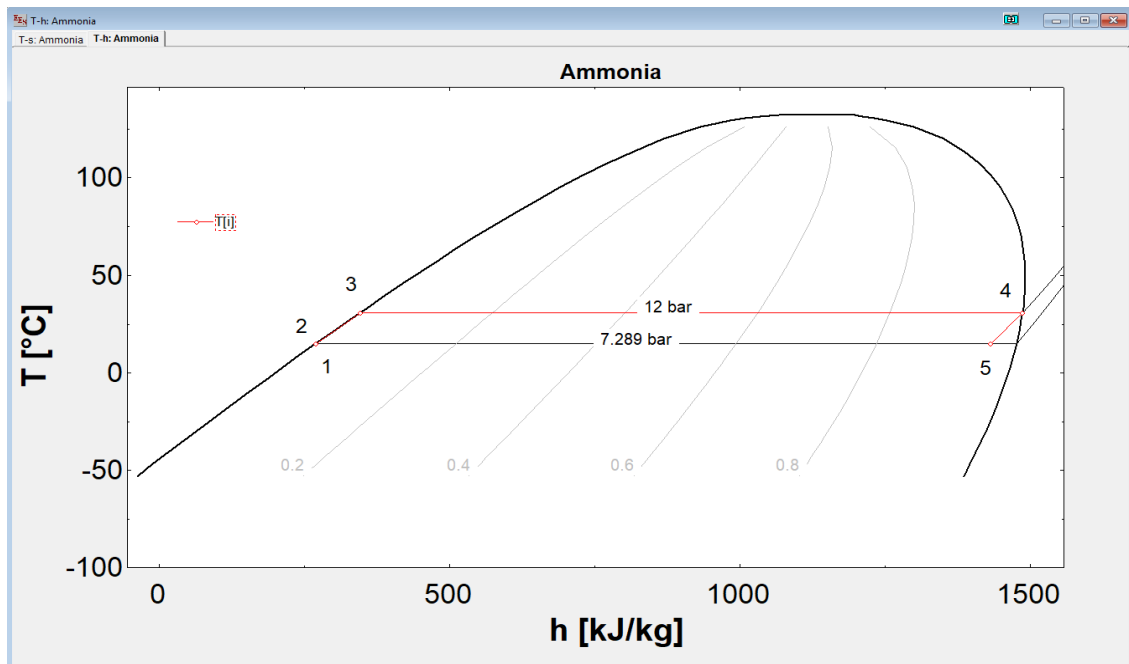
Elaboración propia

Figura N° 47: Diagrama T-s Amoniaco



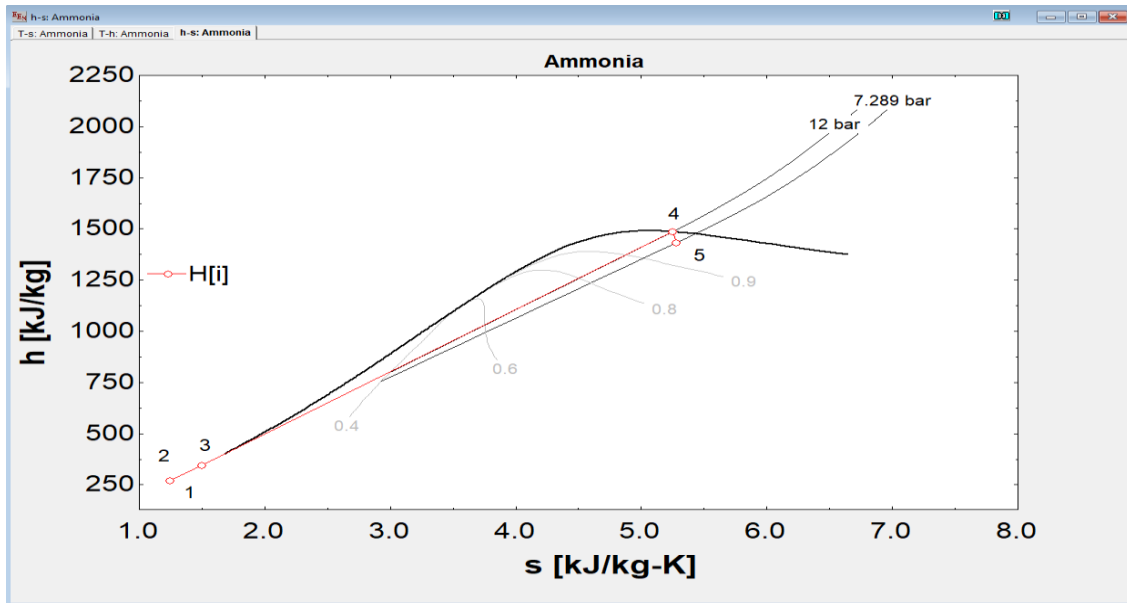
Fuente: EES

Figura N° 48: Diagrama T-h Amoniaco



Fuente: EES

**Figura N° 49: Diagrama h-s Amoniaco**



Fuente: EES

#### 4.1.2. Butano

**Tabla N° 14: Parámetros iniciales para Butano**

PARÁMETROS INICIALES			
Pa	1	Bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	52	°C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	2.214	Bar	Presión a la salida de la turbina
P2	3.6	Bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	15	°C	Temperatura de condensación
<i>Ngen</i>	0.96	%	Eficiencia del generador
<i>Nm</i>	0.87	%	Eficiencia mecánica
<i>Nt</i>	0.88	%	Eficiencia de la turbina
<i>Nb</i>	0.9	%	Eficiencia de la bomba
$\Delta T_{pp}$	5	°C	Temperatura Pinch Point
<i>Tx</i>	15	°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
<i>mAE</i>	70	kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
$\Delta P_{x-y}$	0.5	Bar	Pérdida de presión en el condensador
<i>Px</i>	1	Bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
<i>mFG</i>	10	kg/s	Flujo másico del fluido geotérmico

Elaboración propia



**Tabla N° 15: Resultados de la planta geotérmica binaria para Butano**

<b>PUNTO N°</b>	<b>hi Kj/Kg</b>	<b>Pi Bar</b>	<b>si Kj/Kg.K</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Xi</b>	<b>Vi m<sup>3</sup>/Kg</b>
<b>1</b>	47.24	2.214	0.1693	15	-100	0.001665
<b>2</b>	47.42	3.6	0.1694	15.05	-100	0.001665
<b>3</b>	83.37	3.6	0.2908	30.77	0	0.001721
<b>4</b>	437	3.6	1.452	30.77	1	0.1124
<b>5</b>	419.9	2.214	1.46	16.13	100	0.1799
<b>A</b>	217.8	1	0.7295	52	-100	0.001013
<b>B</b>	149.8	0.0587	0.5154	35.77	0	0.001006
<b>C</b>	142.9	0.05358	0.493	34.12	0	0.001006
<b>X</b>	63.01	1	0.2242	15	-100	0.001001
<b>Y</b>	73.23	0.5	0.2597	17.45	-100	0.001001

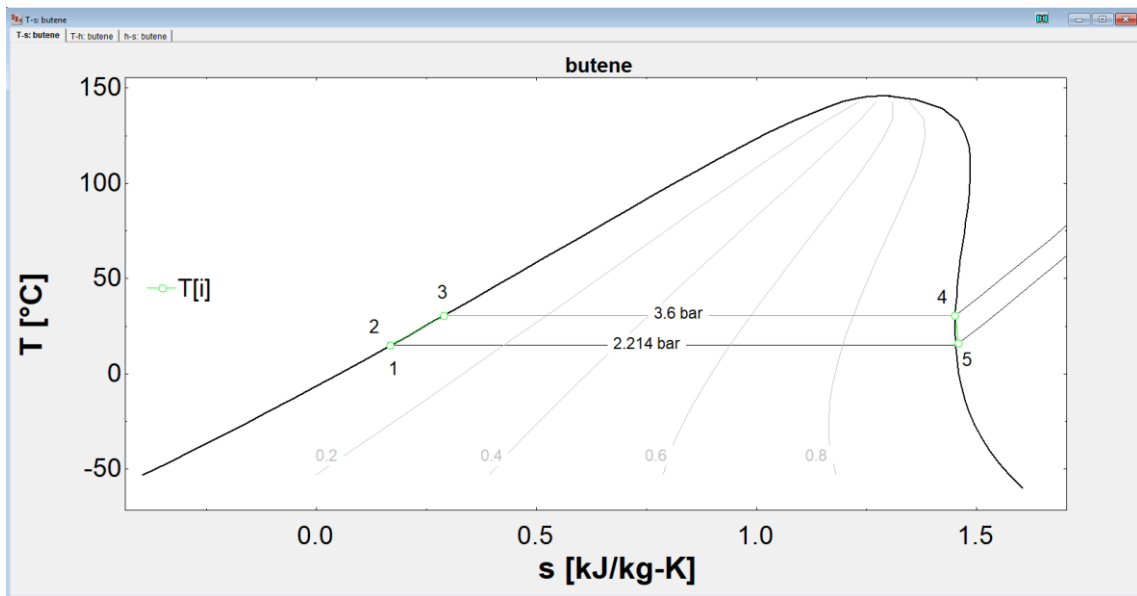
Elaboración propia

**Tabla N° 16: Características de la central geotérmica binaria para Butano**

<b>BUTANO</b>		
Potencia de generación	KW	27.2
Flujo másico geotermal	Kg/s	10
Flujo másico del fluido de trabajo	Kg/s	1.919
Eficiencia térmica	%	3.637

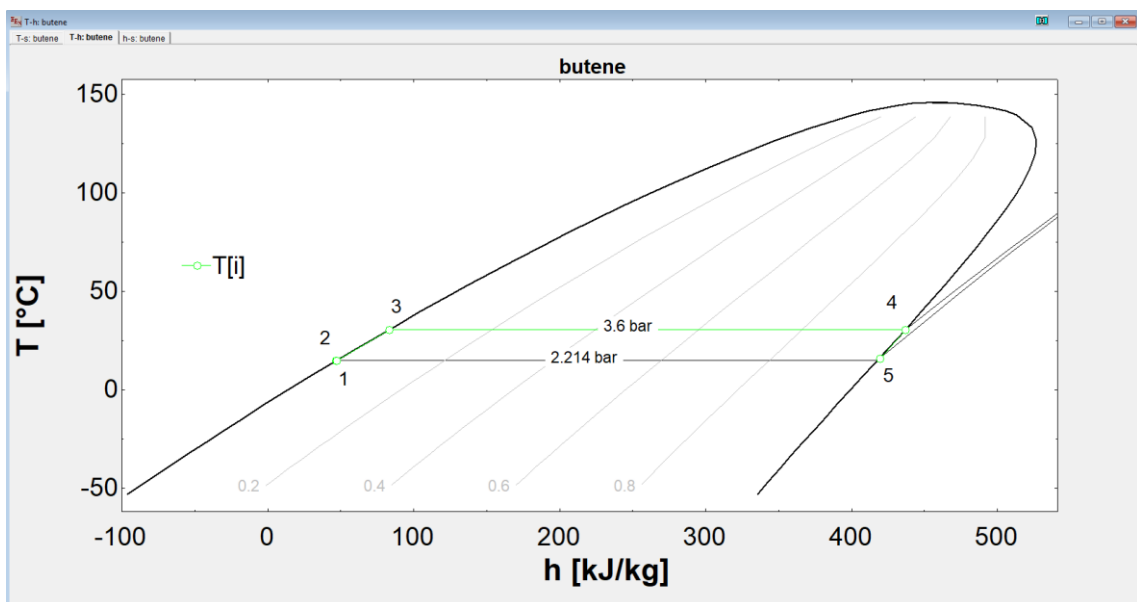
Elaboración propia

**Figura N° 50: Diagrama T-s Butano**



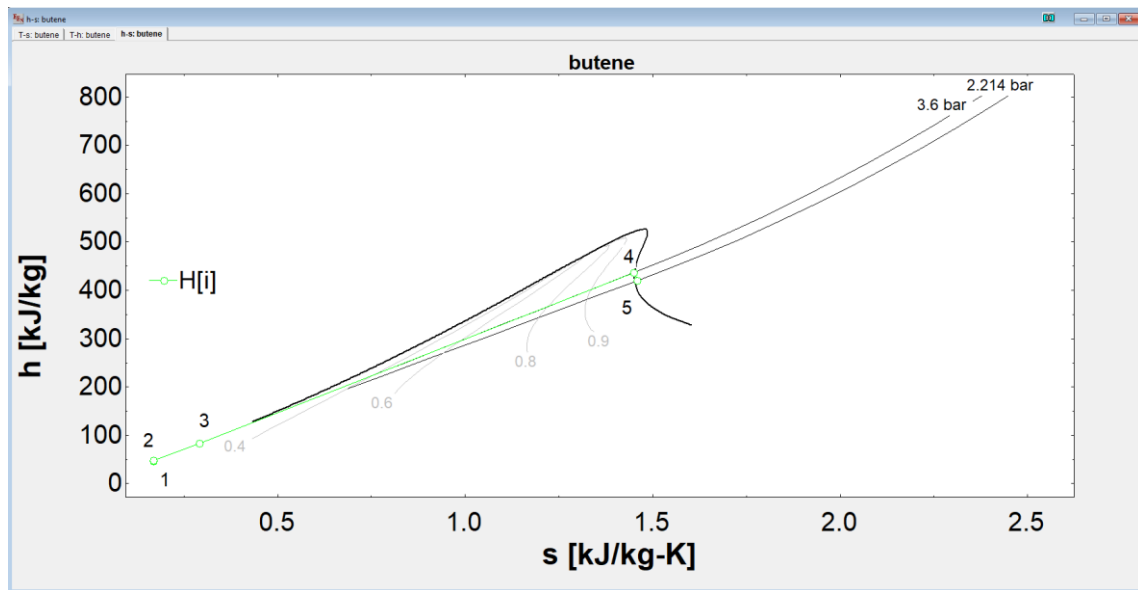
Fuente: EES

**Figura N° 51: Diagrama T-h Butano**



Fuente: EES

**Figura N° 52: Diagrama h-s Butano**



Fuente: EES

#### 4.1.3. Isobutano

**Tabla N° 17: Parámetros iniciales para Isobutano**

PARÁMETROS INICIALES			
Pa	1	Bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	52	°C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	2.588	Bar	Presión a la salida de la turbina
P2	4.2	Bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	15	°C	Temperatura de condensación
<i>Ngen</i>	0.96	%	Eficiencia del generador
<i>Nm</i>	0.87	%	Eficiencia mecánica
<i>Nt</i>	0.88	%	Eficiencia de la turbina
<i>Nb</i>	0.9	%	Eficiencia de la bomba
$\Delta T_{pp}$	5	°C	Temperatura Pinch Point
<i>Tx</i>	15	°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
<i>mAE</i>	70	kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
$\Delta P_{x-y}$	0.5	Bar	Pérdida de presión en el condensador
<i>Px</i>	1	Bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
<i>mFG</i>	10	kg/s	Flujo másico del fluido geotérmico

Elaboración propia



**Tabla N° 18: Resultados de la planta geotérmica binaria para Isobutano**

<b>PUNTO N°</b>	<b>hi Kj/Kg</b>	<b>Pi Bar</b>	<b>si Kj/Kg.K</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Xi</b>	<b>Vi m<sup>3</sup>/Kg</b>
<b>1</b>	235.2	2.588	1.125	15	-100	0.001778
<b>2</b>	235.5	4.2	1.125	15.09	-100	0.001777
<b>3</b>	275.2	4.2	1.259	31.35	0	0.001846
<b>4</b>	597	4.2	2.316	31.35	1	0.09202
<b>5</b>	580.6	2.588	2.323	18.12	100	0.1485
<b>A</b>	217.8	1	0.7295	52	-100	0.001013
<b>B</b>	152.2	0.06059	0.5232	36.35	0	0.001007
<b>C</b>	144.2	0.05448	0.497	34.42	0	0.001006
<b>X</b>	63.01	1	0.2242	15	-100	0.001001
<b>Y</b>	73.05	0.5	0.2591	17.41	-100	0.001001

Elaboración propia

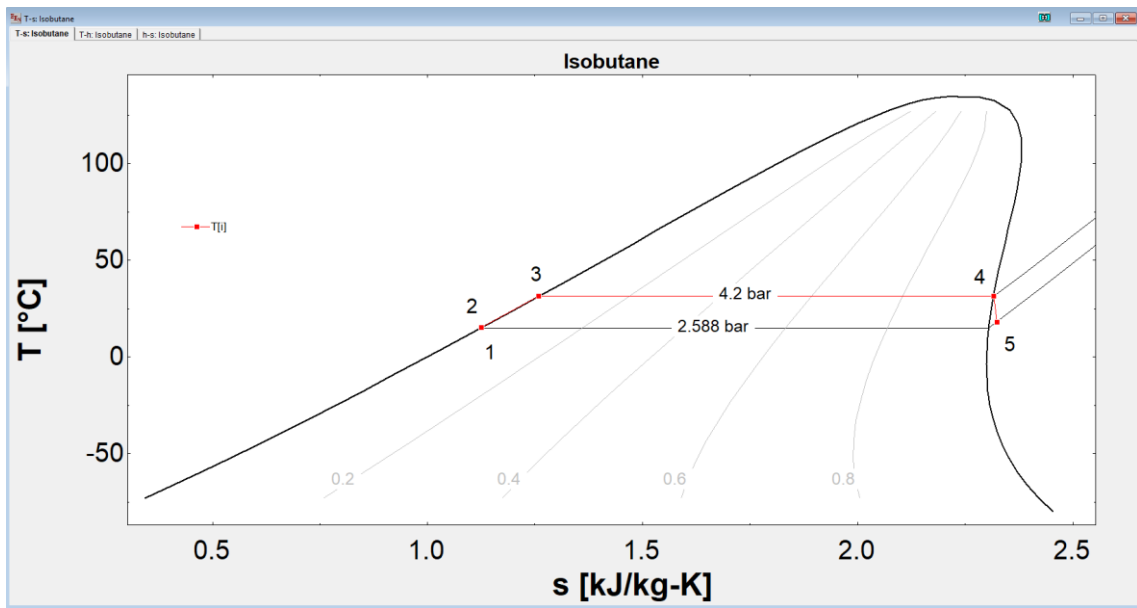
**Tabla N° 19: Características de la central geotérmica binaria para Isobutano**

<b>ISOBUTANO</b>		
Potencia de generación	KW	27.31
Flujo másico geotermal	Kg/s	10
Flujo másico del fluido de trabajo	Kg/s	2.034
Eficiencia térmica	%	3.715

Elaboración propia

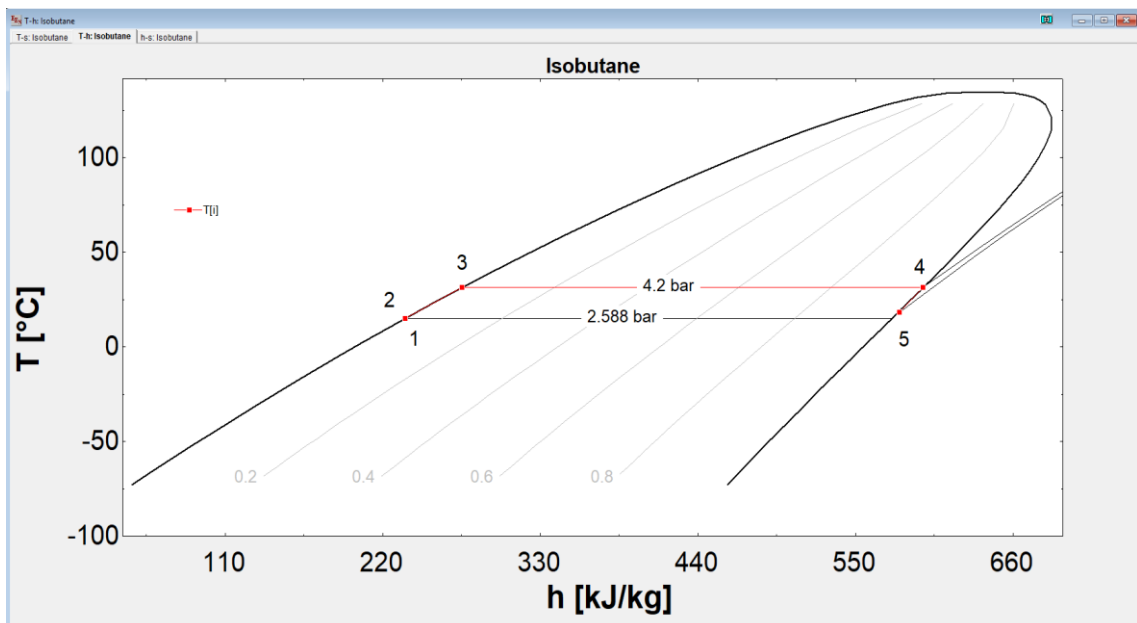


Figura N° 53: Diagrama T-s Isobutano



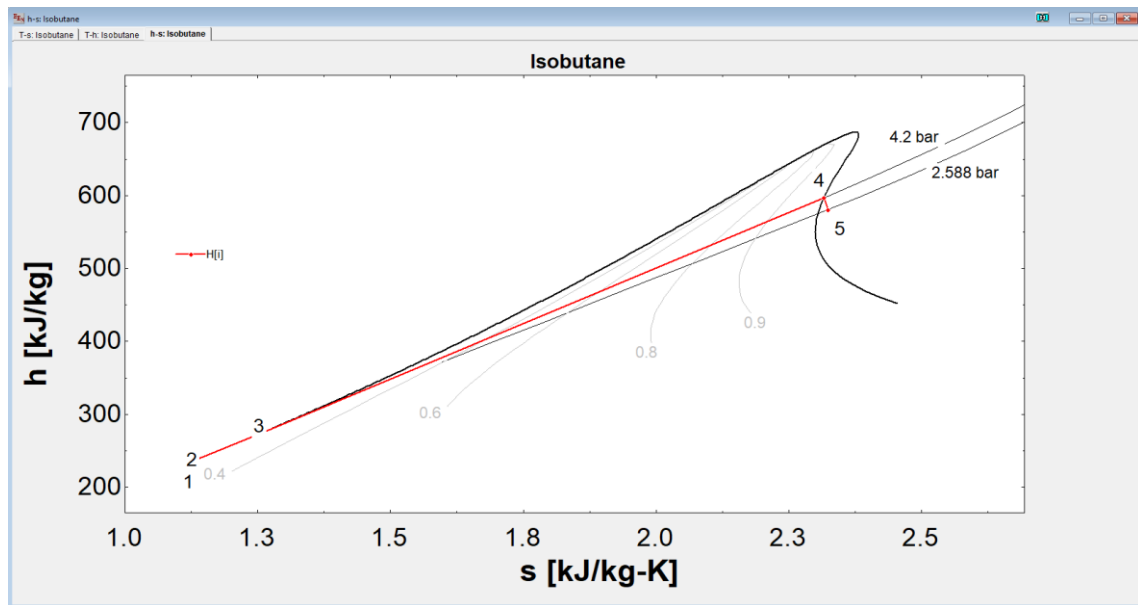
Fuente: EES

Figura N° 54: Diagrama T-h Isobutano



Fuente: EES

**Figura N° 55: Diagrama h-s Isobutano**



Fuente: EES

#### 4.1.4 Propano

**Tabla N° 20: Parámetros iniciales para Propano**

PARÁMETROS INICIALES			
Pa	1	Bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	52	°C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	7.317	Bar	Presión a la salida de la turbina
P2	11.1	Bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	15	°C	Temperatura de condensación
<i>Ngen</i>	0.96	%	Eficiencia del generador
<i>Nm</i>	0.87	%	Eficiencia mecánica
<i>Nt</i>	0.88	%	Eficiencia de la turbina
<i>Nb</i>	0.9	%	Eficiencia de la bomba
$\Delta T_{pp}$	5	°C	Temperatura Pinch Point
<i>Tx</i>	15	°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
<i>mAE</i>	70	kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
$\Delta P_{x-y}$	0.5	Bar	Pérdida de presión en el condensador
<i>Px</i>	1	Bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
<i>mFG</i>	10	kg/s	Flujo másico del fluido geotérmico

Elaboración propia

**Tabla N° 21: Resultados de la planta geotérmica binaria para Propano**

<b>PUNTO N°</b>	<b>hi Kj/Kg</b>	<b>Pi Bar</b>	<b>si Kj/Kg.K</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Xi</b>	<b>Vi m<sup>3</sup>/Kg</b>
1	238.7	7.317	1.136	15	-100	0.001971
2	239.5	11.1	1.136	15.28	-100	0.001969
3	282.6	11.1	1.282	31.15	0	0.002074
4	606.6	11.1	2.346	31.15	1	0.04136
5	589.7	7.317	2.354	15	0.9972	0.06299
A	217.8	1	0.7295	52	-100	0.001013
B	151.4	0.05995	0.5206	36.15	0	0.001006
C	142.6	0.05336	0.492	34.04	0	0.001006
X	63.01	1	0.2242	15	-100	0.001001
Y	73.27	0.5	0.2598	17.46	-100	0.001001

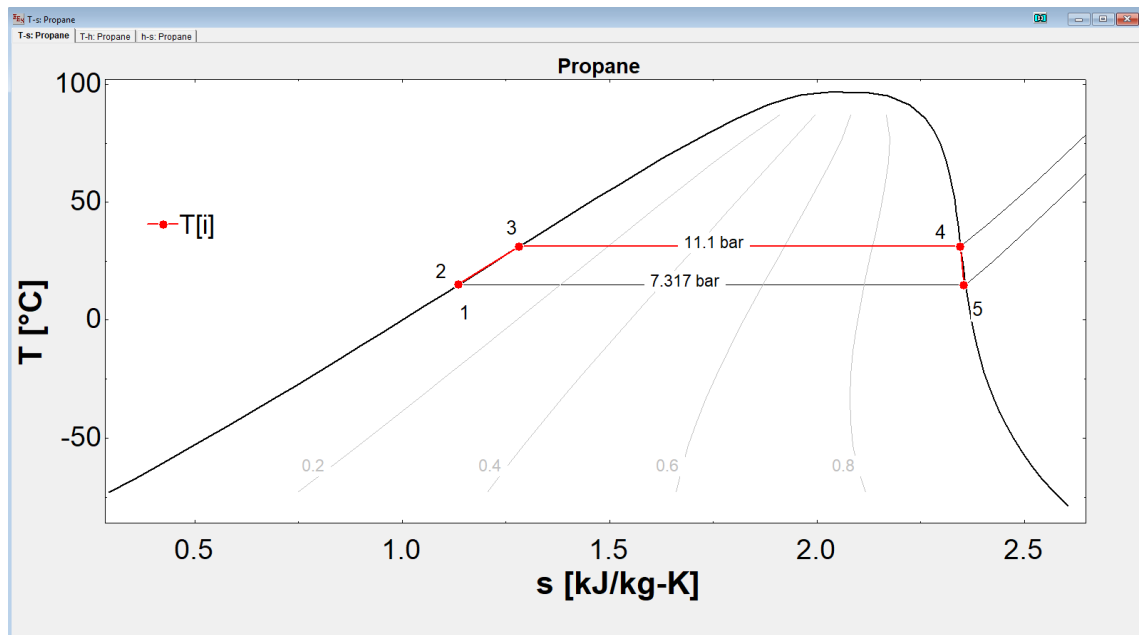
Elaboración propia

**Tabla N° 22: Características de la central geotérmica binaria para Propano**

<b>PROPANO</b>		
Potencia de generación	KW	27.35
Flujo másico geotermal	Kg/s	10
Flujo másico del fluido de trabajo	Kg/s	2.045
Eficiencia térmica	%	3.643

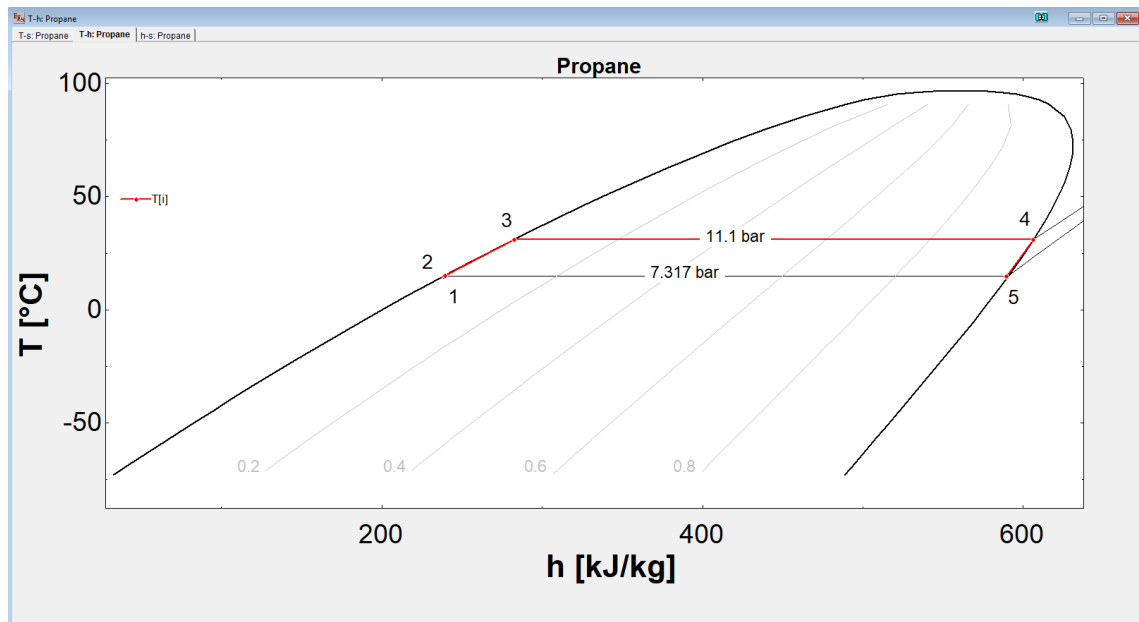
Elaboración propia

Figura N° 56: Diagrama T-s Propano



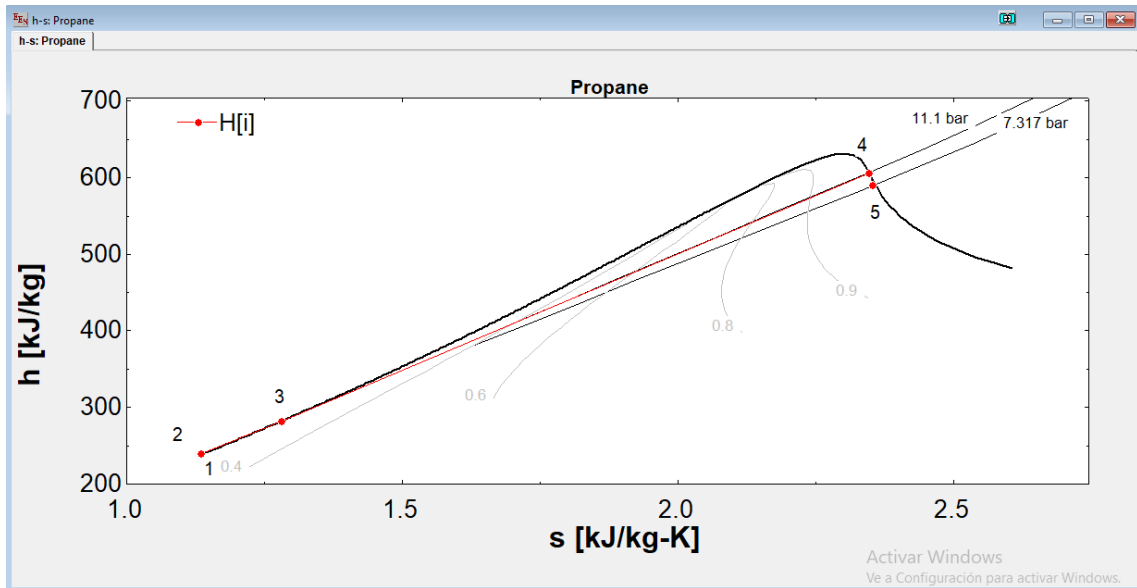
Fuente: EES

Figura N° 57: Diagrama T-h Propano



Fuente: EES

**Figura N° 58: Diagrama h-s Propano**



Fuente: EES

#### 4.1.5. R143a

**Tabla N° 23: Parámetros iniciales para R143a**

PARÁMETROS INICIALES			
Pa	1	Bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	52	°C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	9.643	Bar	Presión a la salida de la turbina
P2	14.9	Bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	15	°C	Temperatura de condensación
<i>Ngen</i>	0.96	%	Eficiencia del generador
<i>Nm</i>	0.87	%	Eficiencia mecánica
<i>Nt</i>	0.88	%	Eficiencia de la turbina
<i>Nb</i>	0.9	%	Eficiencia de la bomba
$\Delta T_{pp}$	5	°C	Temperatura Pinch Point
<i>Tx</i>	15	°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
<i>mAE</i>	70	kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
$\Delta P_{x-y}$	0.5	Bar	Pérdida de presión en el condensador
<i>Px</i>	1	Bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
<i>mFG</i>	10	kg/s	Flujo másico del fluido geotérmico

Elaboración propia

**Tabla N° 24: Resultados de la planta geotérmica binaria para R143a**

PUNTO N°	hi Kj/Kg	Pi Bar	si Kj/Kg.K	Ti °C	Xi	Vi m <sup>3</sup> /Kg
1	223	9.643	1.081	15	-100	0.001031
2	223.7	14.9	1.081	15.44	-100	0.001028
3	250.1	14.9	1.17	31.5	0	0.001109
4	400.4	14.9	1.664	31.5	1	0.01436
5	392.1	9.643	1.668	15	0.9848	0.02287
A	217.8	1	0.7295	52	-100	0.001013
B	152.9	0.0611	0.5253	36.5	0	0.001007
C	141.4	0.05255	0.4882	33.77	0	0.001006
X	63.01	1	0.2242	15	-100	0.001001
Y	73.43	0.5	0.2604	17.5	-100	0.001001

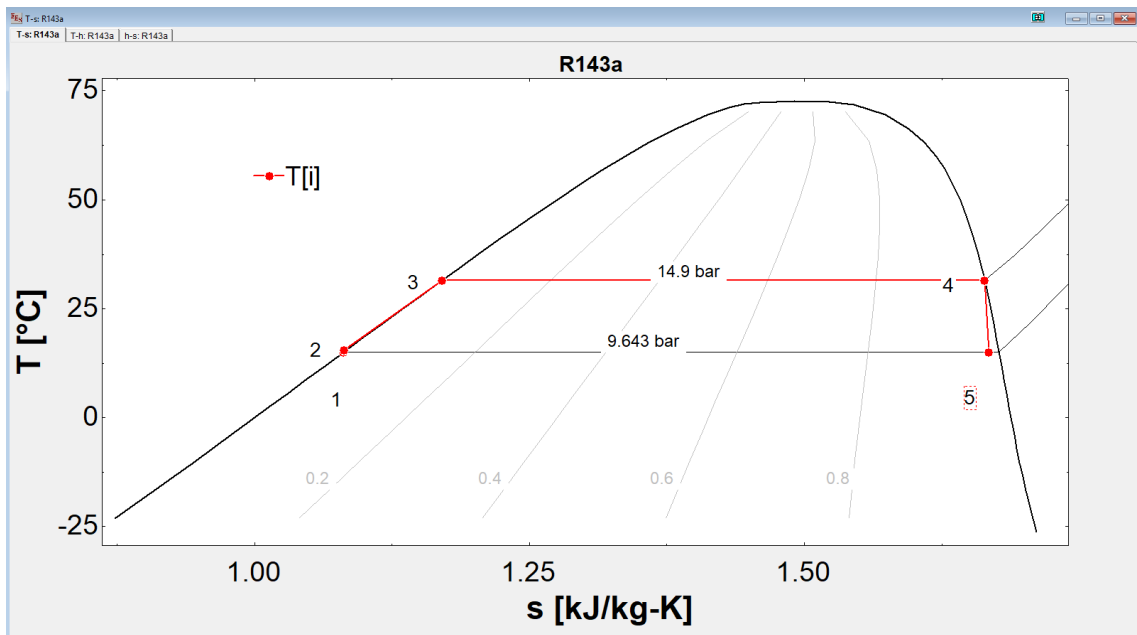
Elaboración propia

**Tabla N° 25: Características de la central geotérmica binaria para R143a**

R143a		
Potencia de generación	KW	27.76
Flujo másico geotermal	Kg/s	10
Flujo másico del fluido de trabajo	Kg/s	4.312
Eficiencia térmica	%	3.642

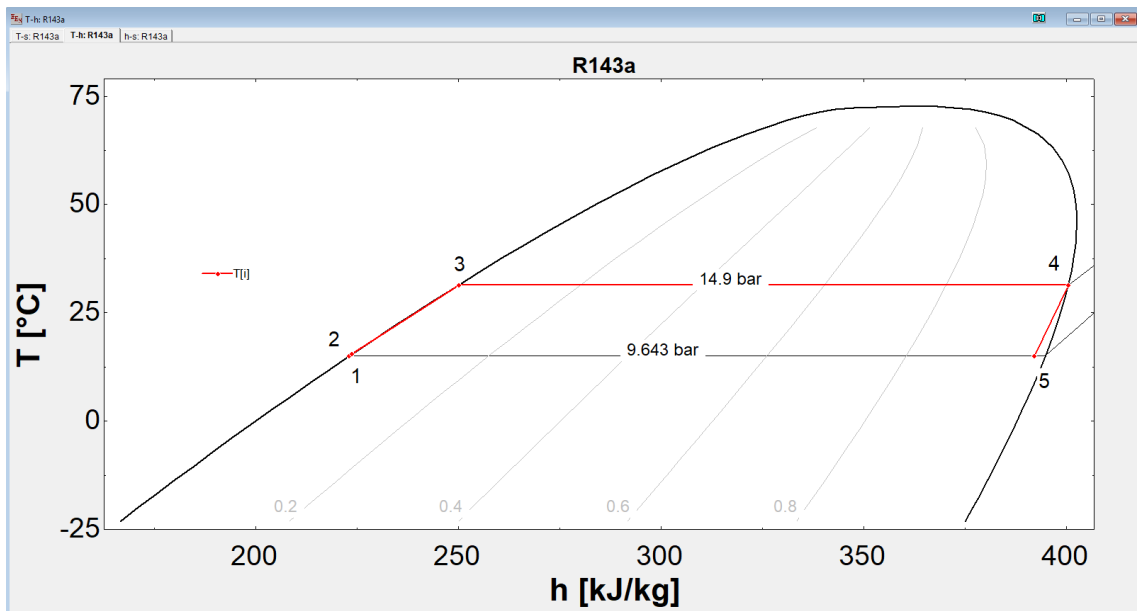
Elaboración propia

Figura N° 59: Diagrama T-s R143a



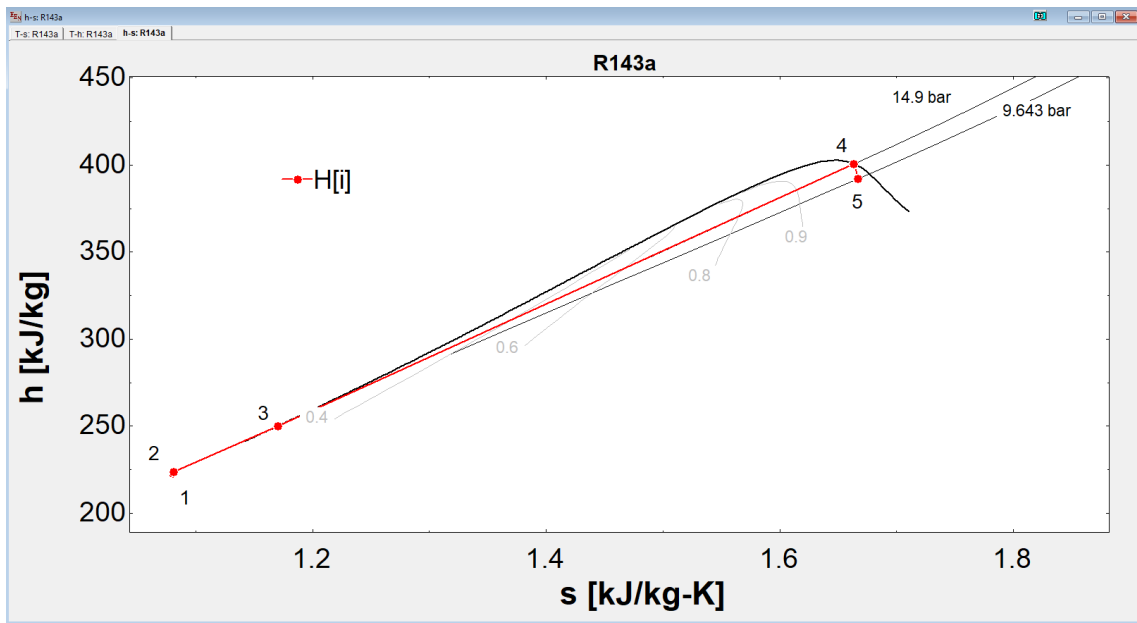
Fuente: EES

Figura N° 60: Diagrama T-h R143a



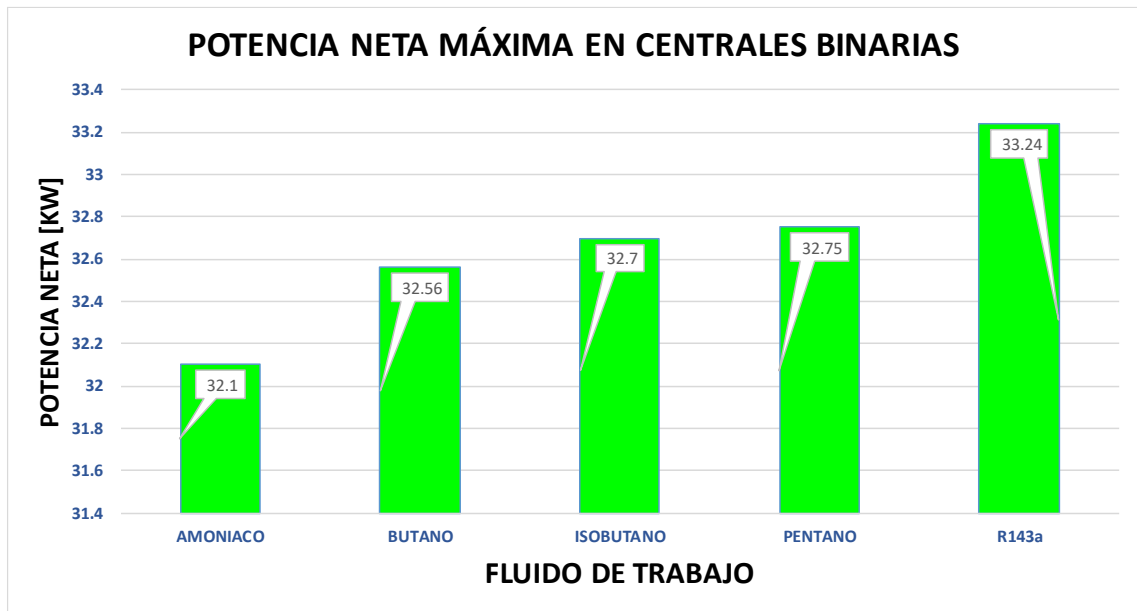
Fuente: EES

Figura N° 61: Diagrama h-s R143a



Fuente: EES

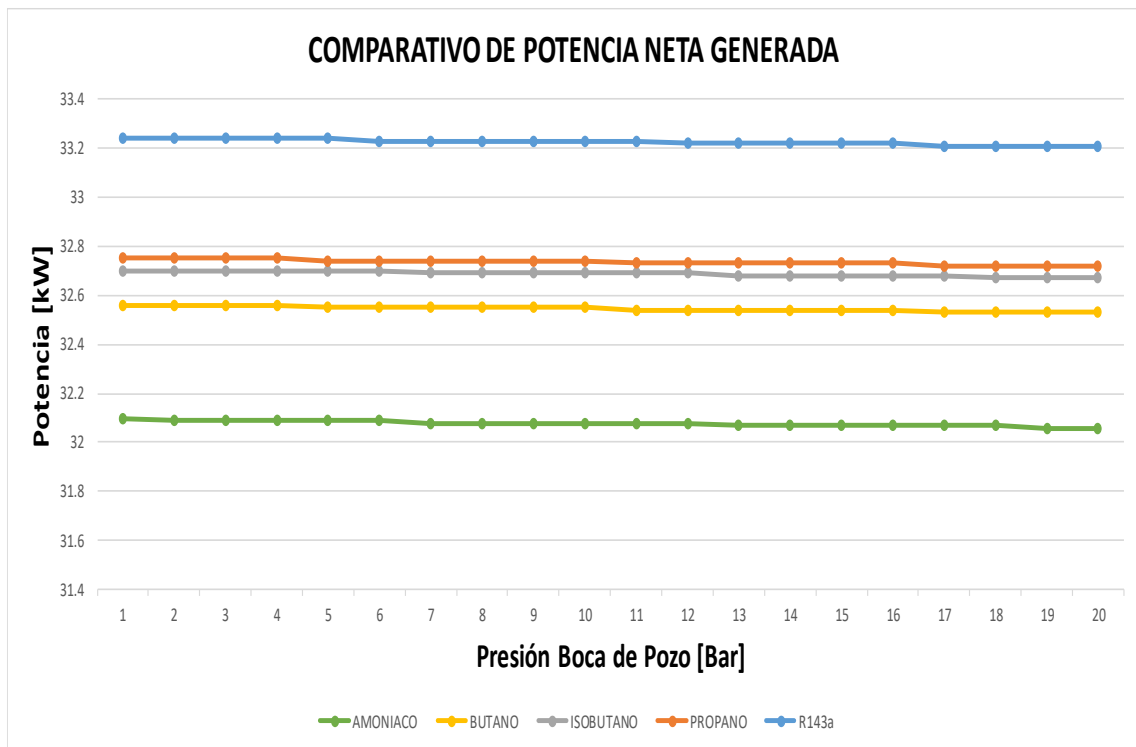
Figura N° 62: Potencia neta máxima de diferentes fluidos de trabajo



Elaboración propia



**Figura N° 63: Potencia neta máxima a diferentes presiones en boca de pozo**



Elaboración propia

**Tabla N° 26: Cuadro de comparativo**

PARAMETROS INICIALES		SUSTANCIA				
		AMONIACO	BUTANO	ISOBUTANO	PROPANO	R134a
Pa	Bar	1	1	1	1	1
Ta	°C	52	52	52	52	52
P5	Bar	7.289	2.214	2.588	7.317	9.643
P2	Bar	12	3.6	4.2	11.1	14.9
T1	°C	15	15	15	15	15
<i>Ngen</i>	%	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
<i>Nm</i>	%	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
<i>Nt</i>	%	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
<i>Nb</i>	%	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$\Delta T_{pp}$	°C	5	5	5	5	5
<i>Tx</i>	°C	15	15	15	15	15
<i>mAE</i>	kg/s	70	70	70	70	70
$\Delta P_{x-y}$	Bar	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>Px</i>	Bar	1	1	1	1	1
<i>mFG</i>	kg/s	10	10	10	10	10
RESULTADOS						
Potencia de generación	KW	26.81	27.2	27.31	27.35	27.76
Flujo másico geotermal	Kg/s	10	10	10	10	10
Flujo másico del fluido de trabajo	Kg/s	0.5892	1.919	2.034	2.045	4.312
Eficiencia térmica	%	3.742	3.637	3.715	3.643	3.642

Elaboración propia

## 4.2. DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL BINARIA PARA 1.5 MW

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° 27: Parámetros iniciales para Isobutano (1.5 MW)**

PARÁMETROS INICIALES			
Pa	1.1	Bar	Presión del fluido geotérmico
Ta	100	°C	Temperatura del fluido geotérmico
P5	5.309	Bar	Presión a la salida de la turbina
P2	10.55	Bar	Presión del pre-calentador y evaporador
T1	40	°C	Temperatura de condensación
<i>Ngen</i>	0.96	%	Eficiencia del generador
<i>Nm</i>	0.87	%	Eficiencia mecánica
<i>Nt</i>	0.88	%	Eficiencia de la turbina
<i>Nb</i>	0.9	%	Eficiencia de la bomba
$\Delta T_{pp}$	5	°C	Temperatura Pinch Point
<i>Tx</i>	15	°C	Temperatura de entrada de agua de enfriamiento
<i>mAE</i>	70	kg/s	Flujo másico del agua de enfriamiento
$\Delta P_{x-y}$	0.5	Bar	Pérdida de presión en el condensador
<i>Px</i>	1	Bar	Presión de entrada del agua de enfriamiento
<i>We</i>	1500	KW	Potencia eléctrica

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 el fluido de trabajo Isobutano, debido a que es de uso común en este tipo de centrales. Dado que este tipo de centrales de ciclo binario usan recursos de baja entalpía se seleccionó las aguas termales de la ciudad de Putina ubicado en la región de Puno para lo cual asumiremos en el estudio una temperatura de pozo de 100°C (*Ta*).



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**

##### **IDEAL**

Debido a que se conoce la presión ( $P_1=P_5=5,309$  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.

$$h_1 = 297 \text{ KJ/Kg}$$

$$s_1 = 1.329 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg.k}}$$

$$v_1 = 0.001887 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

$$x_1 = 0$$

##### **REAL**

En el punto 2, se conoce la presión ( $P_2=P_3=P_4=10.55\text{Bar}$ ) e idealmente la entropía del fluido antes y después de la bomba son iguales ( $s_{2i}=s_1=1.329$  KJ/kg.K). Con



estos parámetros conocidos se puede calcular la entalpía ideal del fluido después de la bomba.

$$h_{2i} = h_1 + v_1(P_2 - P_1) * 100 \dots (13)$$

$$h_{2i} = 297 + 0.001887(10.55 - 5.309) * 100$$

$$h_{2i} = 297.989 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

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

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

$$h_2 = 297 + \left( \frac{297.989 - 297}{0.9} \right)$$

$$h_2 = 298.099 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

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

$$s_2 = 1.329 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_2 = 40.36^\circ\text{C}$$

### 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 ( $P_3=P_2=10.55$  bar). Con estos datos es posible hallar los demás parámetros:

$$h_3 = 373.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_3 = 1.559 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_3 = 68.66^\circ\text{C}$$



### 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 ( $P_4=P_3=10.55 \text{ bar}$ ). Conociendo esto ya se pueden hallar los demás parámetros:

$$h_4 = 644.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_4 = 2.353 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_4 = 68.66^\circ\text{C}$$

### d) En la turbina

Idealmente la entropía antes y después de la turbina son iguales ( $s_{5i}=s_4=2.353 \text{ KJ/kg}$ ) y junto con la presión después de la turbina ( $P_5=5,309 \text{ bar}$ ) hallamos la entalpía ideal del isobutano:

$$h_{5i} = 617.8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$T_{5i} = 44.81^\circ\text{C}$$

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

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

$$h_5 = 644.8 - 0.88 * (644.8 - 617.8)$$

$$h_5 = 621.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

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

$$s_5 = 2.363 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_5 = 46.48^\circ\text{C}$$



### e) Flujo de masa del Isobutano

#### Trabajo desarrollado por la Turbina

$$W_t = h_4 - h_5 \dots (16)$$

$$W_t = 644.8 - 621.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$W_t = 23.7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

#### Trabajo consumido por la Bomba

$$W_b = h_2 - h_1 \dots (17)$$

$$W_b = 298.099 - 297 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$W_b = 1.099 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\dot{m}_{FT} = \frac{W_e}{(W_t - W_b)} \dots (18)$$

$$\dot{m}_{FT} = \frac{1500}{(23.7 - 1.099)}$$

$$\dot{m}_{FT} = 66.369 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

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

$$T_b = T_3 + \Delta T_{pp} \dots (19)$$

$$T_b = 68.66 + 5$$

$$T_b = 73.66^\circ\text{C}$$

Se usa siguiente fórmula que relaciona el flujo del fluido de trabajo con el flujo del fluido geotérmico:

$$\dot{m}_{FG} \cdot c_{FG}(T_a - T_b) = \dot{m}_{FT} (h_4 - h_3) \dots (20)$$

$$\dot{m}_{FG} = \dot{m}_{FT} * \frac{(h_4 - h_3)}{c_{FG}(T_a - T_b)} \dots (21)$$



$$\dot{m}_{FG} = 66.369 * \frac{(644.8 - 373.5)}{4.217(100 - 73.66)}$$

$$\dot{m}_{FG} = 162.105 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Este cálculo justifica que la máxima potencia que puedo generar es de 1.5 MW

#### f) En el condensador

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

$$h_x = 92.29 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_x = 0.3246 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

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

$$P_y = P_x - \Delta P_{x-y} \dots (22)$$

$$P_y = 1 - 0.5$$

$$P_y = 0.5 \text{ Bar}$$

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

$$\dot{m}_{FT} = 66.369 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{AE} = 70 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

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

$$\dot{m}_{AE}(h_y - h_x) = \dot{m}_{FT}(h_5 - h_1) \dots (23)$$

$$70(h_y - 92.29) = 66.369(621.1 - 297)$$

$$h_y = 399.578 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$



$$s_5 = 1.255 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg. K}}$$

$$T_5 = 81.34^\circ\text{C}$$

**g) Parámetros de entrada al evaporador (fluido geotérmico)**

Se tienen los parámetros de temperatura de entrada al evaporador ( $T_a=100^\circ\text{C}$ ) y presión de entrada ( $P_a=1.1$  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.

$$h_a = 419.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_a = 1.307 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg. K}}$$

**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  $5^\circ\text{C}$  como lo vimos anteriormente.

$$T_b = T_3 + \Delta T_{pp} \dots (24)$$

$$T_b = 68.66 + 5$$

$$T_b = 73.66^\circ\text{C}$$

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

$$h_b = 308.3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_b = 0.9993 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg. K}}$$

$$P_b = 0.3645 \text{ Bar}$$





### i) Parámetros de salida del precalentador (fluido geotérmico)

Por las entalpías del Isobutano, notamos que el 78% del total de calor transferido del fluido geotérmico ocurre en el evaporador. Usando triángulos similares, podemos hallar la temperatura a la salida del precalentador ( $T_c$ ).

$$\frac{T_a - T_c}{T_a - T_b} = \frac{h_4 - h_2}{h_4 - h_3} \dots (25)$$

$$\frac{100 - T_c}{100 - 73.66} = \frac{644.8 - 298.099}{644.8 - 373.5}$$

$$T_c = 66.339^\circ\text{C}$$

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.

$$\dot{m}_{FG} \cdot c_{FG}(T_b - T_c) = \dot{m}_{FT} (h_3 - h_2) \dots (26)$$

$$162.105.4.217(73.66 - T_c) = 66.369 (373.5 - 298.099)$$

$$T_c = 66.339^\circ\text{C}$$

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

$$h_c = 277.6 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$s_b = 0.9099 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$P_b = 0.2655 \text{ Bar}$$

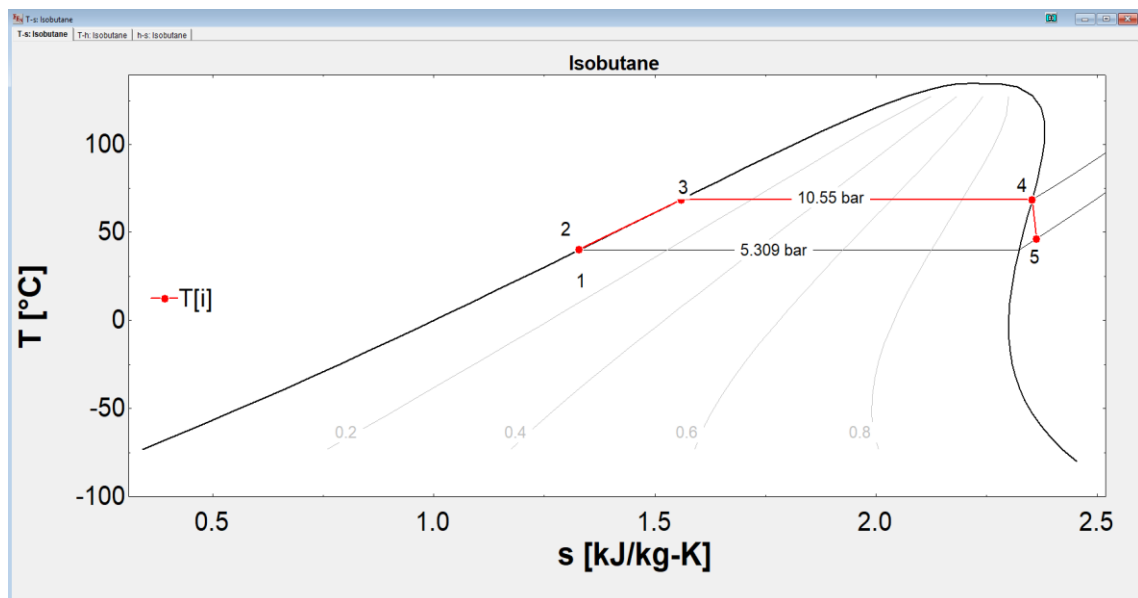
En la siguiente Tabla 24 se muestran los resultados que fueron obtenidos.

**Tabla N° 28: Resultados de la planta geotérmica binaria para Isobutano (1.5 MW)**

PUNTO N°	hi Kj/Kg	Pi Bar	si Kj/Kg.K	Ti °C	Xi	Vi m <sup>3</sup> /Kg
1	297	5.309	1.329	40	-100	0.001887
2	298.099	10.55	1.329	40.36	-100	0.001883
3	373.5	10.55	1.559	68.66	0	0.00205
4	644.8	10.55	2.353	68.66	1	0.03638
5	621.1	5.309	2.363	46.48	100	0.0756
A	419.1	1.1	1.307	100	-100	0.001043
B	308.3	0.3645	0.9993	73.66	0	0.001025
C	277.6	0.2655	0.9099	66.339	0	0.001021
X	92.29	1	0.3246	22	-100	0.001002
Y	399.578	0.5	1.255	81.34	0.02522	0.08274

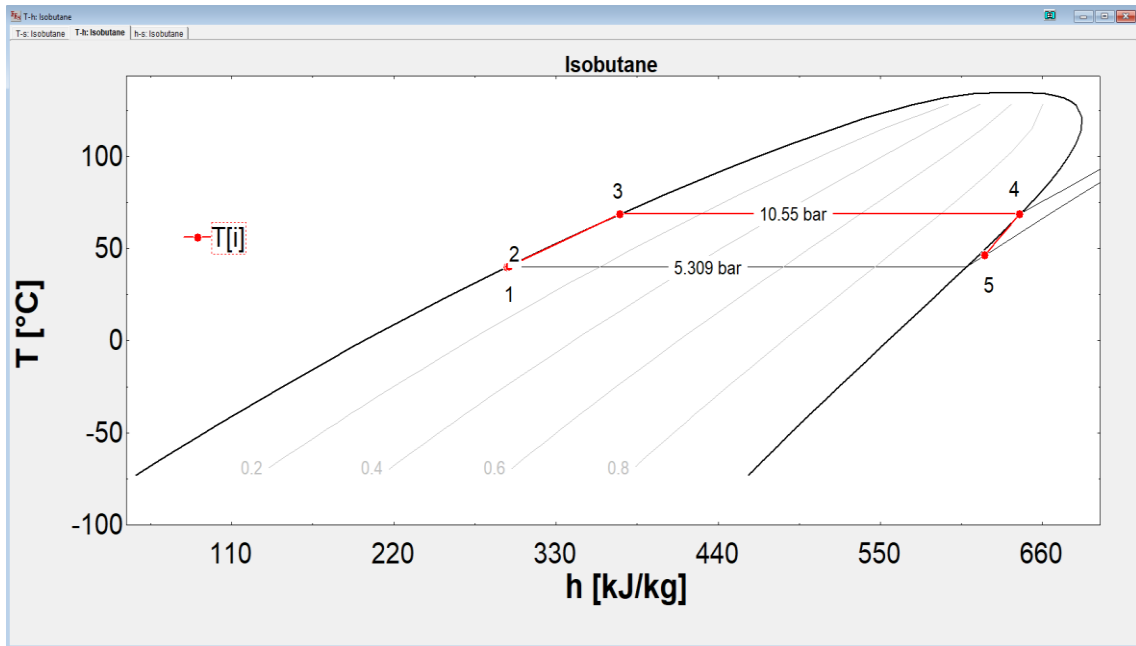
Elaboración propia

**Figura N° 64: Diagrama T-s Isobutano (1.5 MW)**



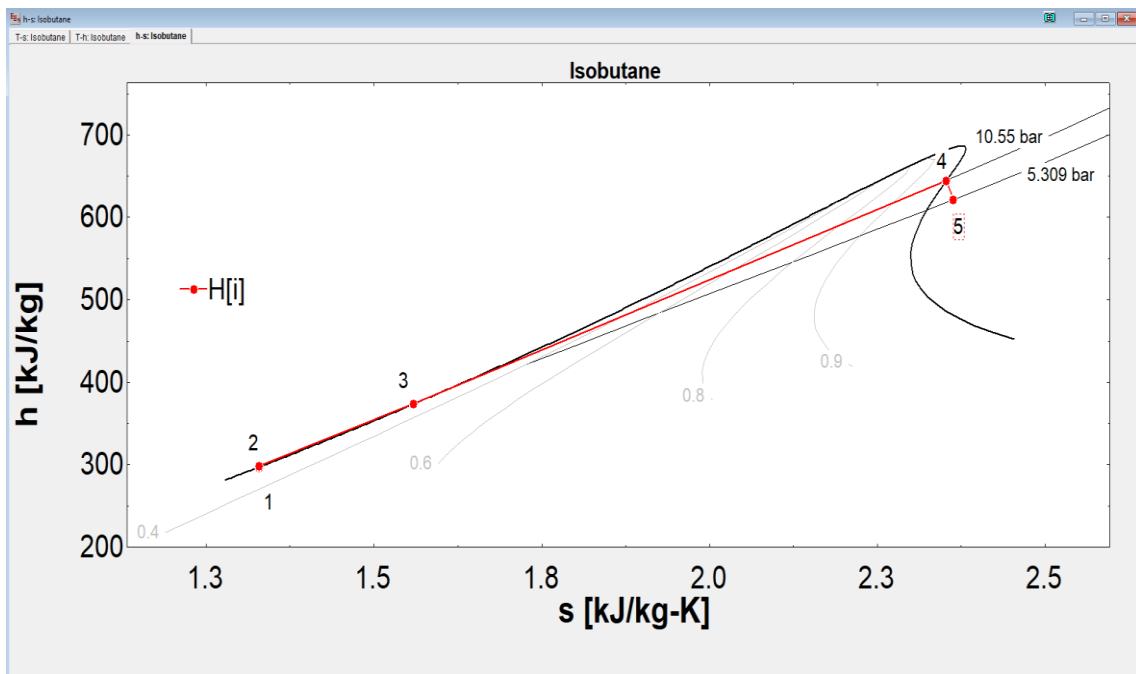
Fuente: EES

**Figura N° 65: Diagrama T-h Isobutano (1.5 MW)**



Fuente: EES

**Figura N° 66: Diagrama h-s Isobutano (1.5 MW)**



Fuente: EES



### Potencia de la bomba de condensado

$$W_b = h_2 - h_1 \dots (27)$$

$$W_b = 298.099 - 297$$

$$W_b = 1.099 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$P_b = W_b * \dot{m}_{FT} \dots (28)$$

$$P_b = 1.099 * 66.369$$

$$P_b = 72.94 \text{ KW}$$

### Potencia de la turbina

$$W_t = h_4 - h_5 \dots (29)$$

$$W_t = 644.8 - 621.1$$

$$W_t = 23.7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$P_t = W_t * \dot{m}_{FT} \dots (30)$$

$$P_t = 23.7 * 66.369$$

$$P_t = 1572.945 \text{ KW}$$

### Potencia neta

$$P_{neta} = P_t - P_b \dots (31)$$

$$P_{neta} = 1572.945 - 72.94$$

$$P_{neta} = 1500.005 \text{ KW}$$

### Potencia de generación

$$P_{gen} = P_{neta} * N_m * N_{gen} \dots (32)$$

$$P_{gen} = 1500.005 * 0.87 * 0.96$$

$$P_{gen} = 1248.005 \text{ KW}$$

### Calor transferido al fluido de trabajo

$$Q_{FT} = \dot{m}_{FT}(h_4 - h_2) \dots (33)$$



$$QFT = 66.369 * (644.8 - 298.099)$$

$$QFT = 23010.199 \text{ KW}$$

### Eficiencia térmica del ciclo

$$\eta T = \frac{P_{gen}}{QFT} \dots (34)$$

$$\eta T = \frac{1293.927}{23010.199}$$

$$\eta T = 5.623\%$$

### 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- En primera instancia se evaluó con las variables que tiene actualmente las aguas termales de la ciudad de Putina, en el departamento de Puno – Perú, para la determinación del mejor fluido de trabajo usando diferentes fluidos de trabajo secundario como el amoniaco, butano, Isobutano, propano y R143a, por tener todos estos fluidos una temperatura de ebullición inferior al agua y facilidad de condensación elementos y métodos convencionales, todo esto únicamente para determinar cuánto es la capacidad de energía eléctrica que se puede obtener con los parámetros actuales que cuenta esta fuente geotermal.
- Se evaluó un análisis con la premisa de obtener 1.5 MW, el cual cubre la totalidad y en sobre dimensión del consumo de energía eléctrica de toda la ciudad de Putina. Para lo cual se utilizó como fluido de trabajo secundario el isobutano, por ser el más utilizado a nivel mundial en centrales binarias y sus propiedades físicas y químicas en favor del medio ambiente.
- El flujo másico del fluido secundario se determina a partir del balance de energía en el intercambiador de calor, considerando las temperaturas de entrada y salida tanto del fluido geotermal como del fluido secundario. Se menciona que el flujo másico geotermal es una variable que, de acuerdo a su manipulación, también



varía el flujo másico del fluido secundario, por lo tanto, este depende del caudal del fluido geotermal que presente el yacimiento.

#### **4.4. SELECCIÓN DEL ISOBUTANO**

Para la selección del Isobutano se realizó cálculos previos y siendo un fluido que es utilizado por una gran cantidad de centrales de ciclo binario a nivel nacional, como también en estudios realizados es adecuado para este tipo de plantas binarias, como se puede citar a continuación:

“En el rango de baja entalpia, 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.” (Matamala Aviles, 2014, p. 2). Asi como tambien podemos citar el siguiente párrafo: “[...] El isobutano resulto ser el fluido de trabajo que entregaba un mejor rendimiento de las centrales de ciclo binario básico, con IHE y regenerativo con IHE. En el caso de las centrales de doble presión el mejor fluido de trabajo fue el isopentano. (LACOURT MORA, 2010, p. 2)



## V. CONCLUSIONES

**PRIMERO:** Las aguas termales de la ciudad de Putina, en la región de Puno – Perú, como resultado del diagnóstico y la evaluación a la temperatura obtuvimos una temperatura promedio de  $52^{\circ}\text{C}$  y realizando un análisis con el amoníaco, butano, isobutano, propano y R143a, obtuvimos una mayor potencia con el R143a con una potencia de generación de 27.76 KW con una eficiencia de 3.642%

**SEGUNDO:** La potencia eléctrica que se propone obtener es de 1.5 MW, con el cual se cubre toda la demanda eléctrica de la ciudad de Putina, realizando cálculos con los datos de operación de los componentes.

**TERCERO:** Se dimensiono y selecciono el caudal en kg/s del fluido geotermal el cual es de 162.105 Kg/s y del fluido secundario de trabajo, cual es de 66.369 Kg/s.



## VI. RECOMENDACIONES

**PRIMERO:** Debido a que nuestro departamento de Puno cuenta con diversas fuentes termales en todo su territorio, se debe continuar con este tipo de investigaciones para así poder aprovechar los recursos geotérmicos que existen en la región de Puno.

**SEGUNDO:** Se recomienda realizar un estudio completo estudios y análisis de viabilidad económica con parámetros como inversión, rentabilidad, los cuales ayudaran a tomar decisiones para su posible construcción del proyecto geotérmico para la producción de energía eléctrica.

**TERCERO:** Se recomienda hacer más investigaciones en buscar alternativas energéticas para dar un inicio en esta nueva era de las energías limpias, energía térmica en las viviendas para un sistema de calefacción y el confort térmico. Los sistemas geotérmicos de baja entalpia son muy usados en países con un alto desarrollo siendo alternativas eficientes, por lo cual, se debe evaluar estos sistemas basados en la realidad peruana.





## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apaza Apaza, J., & Olazábal 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.
- Barriga Grez, S. A. (2007). *Generación eléctrica geotérmica en Chile : análisis de las condiciones para su desarrollo sustentable*. Chile.
- Bona, P., & Coviello, M. (2016). *Valorización y de gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur*. Naciones Unidas.
- BULNES JIMÉNEZ, J. A. (2018). “DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA BASADA EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO UBICADA EN EL YACIMIENTO GEOTÉRMICO JESÚS MARÍA - MOQUEGUA”. LAMBAYEQUE.
- Córdova Zapata, L. F. (2007). *Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica 50 MW*. Lima.
- DiPippo, R. (2008). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Massachusetts: Third Edition.
- Gonzales García, M. A., Jiménez Carranza, R. V., & Melgar Escobar, M. E. (2005). *Estudio técnico y evaluación económica para la implementación de una planta de ciclo binario en el campo geotérmico de Berlín, Usulután*. San Salvador.
- IDAE. (2011). *Evaluación del potencial de energía térmica*.
- INGEMMET. (2014). *Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región de Moquegua*. Lima.
- Kopuničová, M. (2009). *Feasibility study of Binary Geothermal Power Plants In Eastern Slovakia*. Elovaquia.
- LACOURT MORA, O. E. (2010). SANTIAGO DE CHILE.



- Mamani Charca, A. G., & Guillen Alanoca, M. J. (2019). *“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA FUENTE TERMAL PUENTE BELLO TITIRE, DISTRITO DE PICHACANI PUNO, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”*. Puno.
- MARCELA, B. (2011). *Design of A Geothermal Binary Sistem For Operation In Remote Areas*. Islandia.
- 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.
- NINEM JICA. (2010). *Plan Maestro para el Desarrollo de la Energia Geotérmica en el Perú*. Lima.
- Peralta Quilla, R., & Miranda Rodriguez, R. (2017). *“ANÁLISIS DE ESTUDIO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA EMPLEANDO ISOBUTANO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA LOCALIDAD DE PUTINA”*. Puno.
- Piedra Lara, A. L. (2011). *Proyecto de una central de generación geotérmica en el Ecuador*. Quito, Ecuador.
- PINEDO MINES, C. F., & RAMIREZ PINTADO, E. G. (2015). *“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA SU APROVECHAMIENTO MEDIANTE UNA CENTRAL DE CICLO BINARIO PARA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN LA REGIÓN CORONGO-ANCASH,PERU”*. NUEVO CHIMBOTE.
- UPME. (2003). *Formulación de un programa basico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difución*. Bogota.

## ANEXO

### ANEXO A: CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA PARA ORC

#### TURBINA DE VAPOR

Las especificaciones de la turbina son las siguientes:

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



Fuente: [https://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/E50001-W410-A101-V3-7800\\_ST%20Broschuere\\_SP\\_LR.pdf](https://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/E50001-W410-A101-V3-7800_ST%20Broschuere_SP_LR.pdf)

## ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR

### 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



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

## ANEXO C: CARACTERÍSTICAS DEL CONDENSADOR

### CONDENSADOR

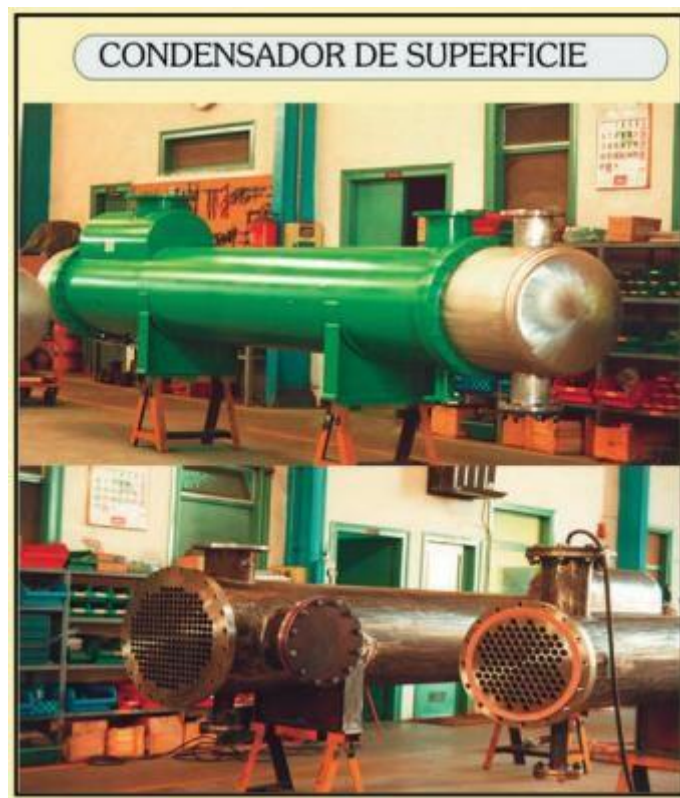
Las principales especificaciones del condensador de superficie son las siguientes:

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



Fuente:[http://www.equirepsa.com/equirepsa2011/wp-content/uploads/pdfs/FC\\_TV10\\_CondensadordeMezclaySuperficie\\_es.pdf](http://www.equirepsa.com/equirepsa2011/wp-content/uploads/pdfs/FC_TV10_CondensadordeMezclaySuperficie_es.pdf)

## **ANEXO D: CARACTERÍSTICAS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

### **TORRE DE ENFRIAMIENTO**

Las principales especificaciones se mencionan a continuación:

Tipo: Húmedo, tiro inducido

Número de celdas: 2



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

## ANEXO E: REGISTRO FOTOGRÁFICO

### RECOLECCIÓN DE DATOS EN LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA



Elaboración propia

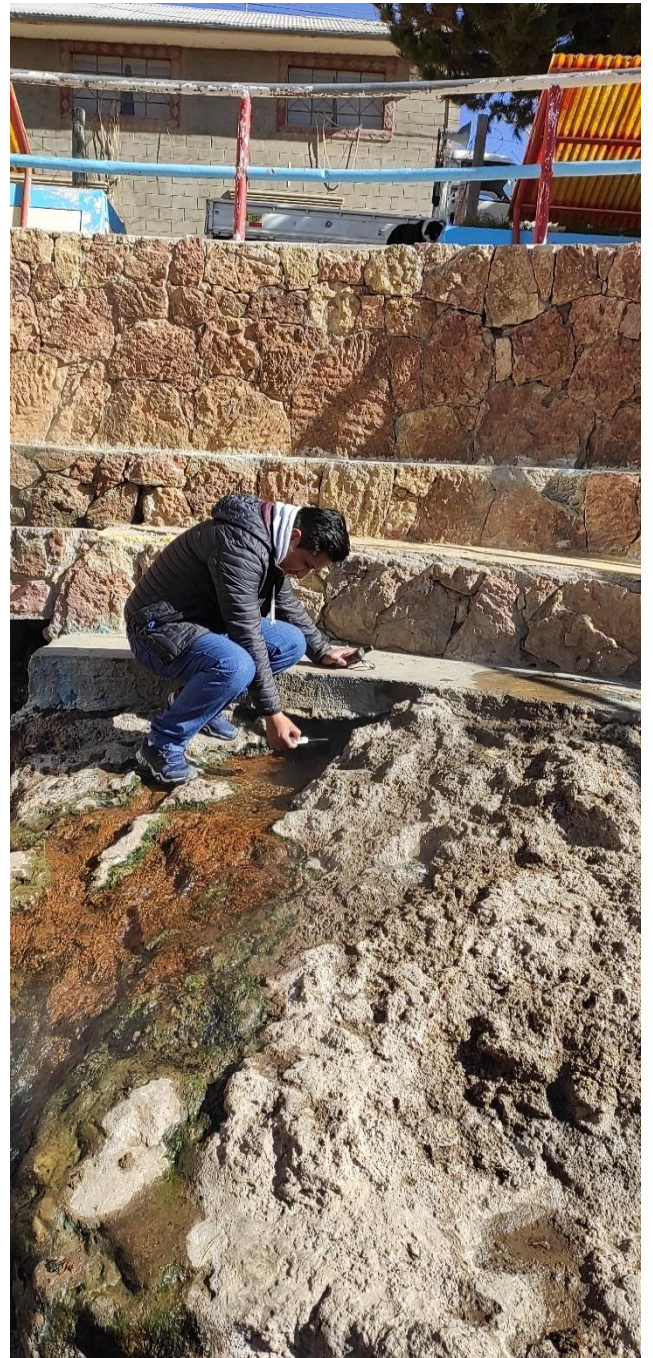
## RECOLECCIÓN DE DATOS EN LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA



Elaboración propia



## RECOLECCIÓN DE DATOS EN LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA



Elaboración propia



## ANEXO F: SOFTWARE EES PROFESIONAL V9.944-3D

### CÁLCULO CON DATOS ACTUALES PARA EL AMONIACO

Ta=52	"Temperatura del fluido geotermico"
Pa=1	"Presion de fluido geotermico"
Tx=15	"Temperatura de entrada de agua de enfriamiento"
Px=1	"Presion de entrada del agua de enfriamiento"
Pxy=0.5	"Perdida de presion en el condesador"
Tpp=5	"Temperatura Pinch Point"
mAE=70	"Flujo masico del agua de enfriamiento"
mFG=10	"Flujo masico del fluido geotermico"
Nb=0.9	"Eficiencia de la Bomba"
Nt=0.88	"Eficiencia de la Turbina"
Nm=0.87	"Eficiencia mecanica"
Ngen=0.96	"Eficiencia del generador"
cFG=cp	"Calor especifico del fluido geotermico"
cp=Cp(Water,T=Ta,P=Pa)	

#### "A) EN LA BOMBA DE CONDENSADO"

##### "ESTADO 1"

P[1]=7.289 [BAR]  
T[1]=15 [C]  
H[1]=Enthalpy(Ammonia,T=T[1],P=P[1])  
S[1]=Entropy(Ammonia,T=T[1],P=P[1])  
V[1]=Volume(Ammonia,T=T[1],P=P[1])  
X[1]=Quality(Ammonia,P=P[1],T=T[1])

##### "ESTADO 2"

P[2]=12 [BAR]  
H[2]=270.7  
S[2]=Entropy(Ammonia,P=P[2],H=H[2])  
T[2]=Temperature(Ammonia,P=P[2],S=S[2])  
V[2]=Volume(Ammonia,P=P[2],H=H[2])  
X[2]=Quality(Ammonia,P=P[2],H=H[2])

#### "B) EN EL PRECALENTADOR"

##### "ESTADO 3"

P[3]=12  
X[3]=0  
H[3]=Enthalpy(Ammonia,P=P[3],X=X[3])  
S[3]=Entropy(Ammonia,P=P[3],X=X[3])  
V[3]=Volume(Ammonia,P=P[3],X=X[3])  
T[3]=Temperature(Ammonia,P=P[3],X=X[3])



## "C) EN EL VAPORIZADOR"

### "ESTADO 4"

$$P[4]=12$$

$$X[4]=1$$

$$H[4]=\text{Enthalpy}(\text{Ammonia}, P=P[4], X=X[4])$$

$$V[4]=\text{Volume}(\text{Ammonia}, P=P[4], X=X[4])$$

$$S[4]=\text{Entropy}(\text{Ammonia}, P=P[4], X=X[4])$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{Ammonia}, P=P[4], X=X[4])$$

## "D) EN LA TURBINA "

### "ESTADO 5"

$$P[5]=7.289$$

$$H[5]=1432$$

$$S[5]=\text{Entropy}(\text{Ammonia}, P=P[5], H=H[5])$$

$$V[5]=\text{Volume}(\text{Ammonia}, P=P[5], H=H[5])$$

$$X[5]=\text{Quality}(\text{Ammonia}, P=P[5], H=H[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{Ammonia}, P=P[5], H=H[5])$$



## CÁLCULO CON DATOS ACTUALES PARA EL BUTANO

Ta=52 "Temperatura del fluido geotermico"  
Pa=1 "Presion de fluido geotermico"  
Tx=15 "Temperatura de entrada de agua de enfriamiento"  
Px=1 "Presion de entrada del agua de enfriamiento"  
Pxy=0.5 "Perdida de presion en el condesador"  
Tpp=5 "Temperatura Pinch Point"  
mAE=70 "Flujo masico del agua de enfriamiento"  
mFG=10 "Flujo masico del fluido geotermico"  
Nb=0.9 "Eficiencia de la Bomba"  
Nt=0.88 "Eficiencia de la Turbina"  
Nm=0.87 "Eficiencia mecanica"  
Ngen=0.96 "Eficiencia del generador"  
cFG=cp "Calor especifico del fluido geotermico"  
cp=Cp(Water,T=Ta,P=Pa)

"A) EN LA BOMBA DE CONDENSADO"

"ESTADO 1"

P[1]=2.214 [BAR]  
T[1]=15 [C]  
H[1]=Enthalpy(butene,T=T[1],P=P[1])  
S[1]=Entropy(butene,T=T[1],P=P[1])  
V[1]=Volume(butene,T=T[1],P=P[1])  
X[1]=Quality(butene,P=P[1],T=T[1])

"ESTADO 2"

P[2]=3.6 [BAR]  
H[2]=47.42  
S[2]=Entropy(butene,P=P[2],H=H[2])  
T[2]=Temperature(butene,P=P[2],S=S[2])  
V[2]=Volume(butene,P=P[2],H=H[2])  
X[2]=Quality(butene,P=P[2],H=H[2])

"B) EN EL PRECALENTADOR"

"ESTADO 3"

P[3]=3.6  
X[3]=0  
H[3]=Enthalpy(butene,P=P[3],X=X[3])  
S[3]=Entropy(butene,P=P[3],X=X[3])  
V[3]=Volume(butene,P=P[3],X=X[3])  
T[3]=Temperature(butene,P=P[3],X=X[3])



## "C) EN EL VAPORIZADOR"

### "ESTADO 4"

$$P[4]=3.6$$

$$X[4]=1$$

$$H[4]=\text{Enthalpy}(\text{butene}, P=P[4], X=X[4])$$

$$V[4]=\text{Volume}(\text{butene}, P=P[4], X=X[4])$$

$$S[4]=\text{Entropy}(\text{butene}, P=P[4], X=X[4])$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{butene}, P=P[4], X=X[4])$$

## "D) EN LA TURBINA "

### "ESTADO 5"

$$P[5]=2.214$$

$$H[5]=419.9$$

$$S[5]=\text{Entropy}(\text{butene}, P=P[5], H=H[5])$$

$$V[5]=\text{Volume}(\text{butene}, P=P[5], H=H[5])$$

$$X[5]=\text{Quality}(\text{butene}, P=P[5], H=H[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{butene}, P=P[5], H=H[5])$$



## CÁLCULO CON DATOS ACTUALES PARA EL ISOBUTANO

Ta=52 "Temperatura del fluido geotermico"  
Pa=1 "Presion de fluido geotermico"  
Tx=15 "Temperatura de entrada de agua de enfriamiento"  
Px=1 "Presion de entrada del agua de enfriamiento"  
Pxy=0.5 "Perdida de presion en el condesador"  
Tpp=5 "Temperatura Pinch Point"  
mAE=70 "Flujo masico del agua de enfriamiento"  
mFG=10 "Flujo masico del fluido geotermico"  
Nb=0.9 "Eficiencia de la Bomba"  
Nt=0.88 "Eficiencia de la Turbina"  
Nm=0.87 "Eficiencia mecanica"  
Ngen=0.96 "Eficiencia del generador"  
cFG=cp "Calor especifico del fluido geotermico"  
cp=Cp(Water,T=Ta,P=Pa)

"A) EN LA BOMBA DE CONDENSADO"

"ESTADO 1"

P[1]=2.588 [BAR]  
T[1]=15 [C]  
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]=4.2 [BAR]  
H[2]=235.5  
S[2]=Entropy(Isobutane,P=P[2],H=H[2])  
T[2]=Temperature(Isobutane,P=P[2],S=S[2])  
V[2]=Volume(Isobutane,P=P[2],H=H[2])  
X[2]=Quality(Isobutane,P=P[2],H=H[2])

"B) EN EL PRECALENTADOR"

"ESTADO 3"

P[3]=4.2  
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])



## "C) EN EL VAPORIZADOR"

### "ESTADO 4"

$$P[4]=4.2$$

$$X[4]=1$$

$$H[4]=\text{Enthalpy}(\text{Isobutane}, P=P[4], X=X[4])$$

$$V[4]=\text{Volume}(\text{Isobutane}, P=P[4], X=X[4])$$

$$S[4]=\text{Entropy}(\text{Isobutane}, P=P[4], X=X[4])$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{Isobutane}, P=P[4], X=X[4])$$

## "D) EN LA TURBINA "

### "ESTADO 5"

$$P[5]=2.588$$

$$H[5]=580.6$$

$$S[5]=\text{Entropy}(\text{Isobutane}, P=P[5], H=H[5])$$

$$V[5]=\text{Volume}(\text{Isobutane}, P=P[5], H=H[5])$$

$$X[5]=\text{Quality}(\text{Isobutane}, P=P[5], H=H[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{Isobutane}, P=P[5], H=H[5])$$



## CÁLCULO CON DATOS ACTUALES PARA EL PROPANO

Ta=52 "Temperatura del fluido geotermico"  
Pa=1 "Presion de fluido geotermico"  
Tx=15 "Temperatura de entrada de agua de enfriamiento"  
Px=1 "Presion de entrada del agua de enfriamiento"  
Pxy=0.5 "Perdida de presion en el condesador"  
Tpp=5 "Temperatura Pinch Point"  
mAE=70 "Flujo masico del agua de enfriamiento"  
mFG=10 "Flujo masico del fluido geotermico"  
Nb=0.9 "Eficiencia de la Bomba"  
Nt=0.88 "Eficiencia de la Turbina"  
Nm=0.87 "Eficiencia mecanica"  
Ngen=0.96 "Eficiencia del generador"  
cFG=cp "Calor especifico del fluido geotermico"  
cp=Cp(Water,T=Ta,P=Pa)

"A) EN LA BOMBA DE CONDENSADO"

"ESTADO 1"

P[1]=7.317 [BAR]  
T[1]=15 [C]  
H[1]=Enthalpy(Propane,T=T[1],P=P[1])  
S[1]=Entropy(Propane,T=T[1],P=P[1])  
V[1]=Volume(Propane,T=T[1],P=P[1])  
X[1]=Quality(Propane,P=P[1],T=T[1])

"ESTADO 2"

P[2]=11.1 [BAR]  
H[2]=239.5  
S[2]=Entropy(Propane,P=P[2],H=H[2])  
T[2]=Temperature(Propane,P=P[2],S=S[2])  
V[2]=Volume(Propane,P=P[2],H=H[2])  
X[2]=Quality(Propane,P=P[2],H=H[2])

"B) EN EL PRECALENTADOR"

"ESTADO 3"

P[3]=11.1  
X[3]=0  
H[3]=Enthalpy(Propane,P=P[3],X=X[3])  
S[3]=Entropy(Propane,P=P[3],X=X[3])  
V[3]=Volume(Propane,P=P[3],X=X[3])  
T[3]=Temperature(Propane,P=P[3],X=X[3])





## "C) EN EL VAPORIZADOR"

### "ESTADO 4"

$$P[4]=11.1$$

$$X[4]=1$$

$$H[4]=\text{Enthalpy}(\text{Propane}, P=P[4], X=X[4])$$

$$V[4]=\text{Volume}(\text{Propane}, P=P[4], X=X[4])$$

$$S[4]=\text{Entropy}(\text{Propane}, P=P[4], X=X[4])$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{Propane}, P=P[4], X=X[4])$$

## "D) EN LA TURBINA "

### "ESTADO 5"

$$P[5]=7.317$$

$$H[5]=589.7$$

$$S[5]=\text{Entropy}(\text{Propane}, P=P[5], H=H[5])$$

$$V[5]=\text{Volume}(\text{Propane}, P=P[5], H=H[5])$$

$$X[5]=\text{Quality}(\text{Propane}, P=P[5], H=H[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{Propane}, P=P[5], H=H[5])$$



## CÁLCULO CON DATOS ACTUALES PARA EL R143a

Ta=52 "Temperatura del fluido geotermico"  
Pa=1 "Presion de fluido geotermico"  
Tx=15 "Temperatura de entrada de agua de enfriamiento"  
Px=1 "Presion de entrada del agua de enfriamiento"  
Pxy=0.5 "Perdida de presion en el condesador"  
Tpp=5 "Temperatura Pinch Point"  
mAE=70 "Flujo masico del agua de enfriamiento"  
mFG=10 "Flujo masico del fluido geotermico"  
Nb=0.9 "Eficiencia de la Bomba"  
Nt=0.88 "Eficiencia de la Turbina"  
Nm=0.87 "Eficiencia mecanica"  
Ngen=0.96 "Eficiencia del generador"  
cFG=cp "Calor especifico del fluido geotermico"  
cp=Cp(Water,T=Ta,P=Pa)

"A) EN LA BOMBA DE CONDENSADO"

"ESTADO 1"

P[1]=9.643 [BAR]  
T[1]=15 [C]  
H[1]=Enthalpy(R143a,T=T[1],P=P[1])  
S[1]=Entropy(R143a,T=T[1],P=P[1])  
V[1]=Volume(R143a,T=T[1],P=P[1])  
X[1]=Quality(R143a,P=P[1],T=T[1])

"ESTADO 2"

P[2]=14.9 [BAR]  
H[2]=223.7  
S[2]=Entropy(R143a,P=P[2],H=H[2])  
T[2]=Temperature(R143a,P=P[2],S=S[2])  
V[2]=Volume(R143a,P=P[2],H=H[2])  
X[2]=Quality(R143a,P=P[2],H=H[2])

"B) EN EL PRECALENTADOR"

"ESTADO 3"

P[3]=14.9  
X[3]=0  
H[3]=Enthalpy(R143a,P=P[3],X=X[3])  
S[3]=Entropy(R143a,P=P[3],X=X[3])  
V[3]=Volume(R143a,P=P[3],X=X[3])  
T[3]=Temperature(R143a,P=P[3],X=X[3])



## "C) EN EL VAPORIZADOR"

### "ESTADO 4"

$$P[4]=14.9$$

$$X[4]=1$$

$$H[4]=\text{Enthalpy}(\text{R143a}, P=P[4], X=X[4])$$

$$V[4]=\text{Volume}(\text{R143a}, P=P[4], X=X[4])$$

$$S[4]=\text{Entropy}(\text{R143a}, P=P[4], X=X[4])$$

$$T[4]=\text{Temperature}(\text{R143a}, P=P[4], X=X[4])$$

## "D) EN LA TURBINA "

### "ESTADO 5"

$$P[5]=9.643$$

$$H[5]=392.1$$

$$S[5]=\text{Entropy}(\text{R143a}, P=P[5], H=H[5])$$

$$V[5]=\text{Volume}(\text{R143a}, P=P[5], H=H[5])$$

$$X[5]=\text{Quality}(\text{R143a}, P=P[5], H=H[5])$$

$$T[5]=\text{Temperature}(\text{R143a}, P=P[5], H=H[5])$$



## CÁLCULO PARA EL ISOBUTANO PARA 1.5 MW

Ta=100 "Temperatura del fluido geotermico"  
Pa=1.1 "Presion de fluido geotermico"  
Tx=22 "Temperatura de entrada de agua de enfriamiento"  
Px=1 "Presion de entrada del agua de enfriamiento"  
Pxy=0.5 "Perdida de presion en el condesador"  
Tpp=5 "Temperatura Pinch Point"  
mAE=70 "Flujo masico del agua de enfriamiento"  
Nb=0.9 "Eficiencia de la Bomba"  
Nt=0.88 "Eficiencia de la Turbina"  
Nm=0.87 "Eficiencia mecanica"  
Ngen=0.96 "Eficiencia del generador"  
cFG=cp "Calor especifico del fluido geotermico"  
We=1500 "Potencia electrica"  
cp=Cp(Water,T=Ta,P=Pa)

"A) EN LA BOMBA DE CONDENSADO"

"ESTADO 1"

P[1]=5.309 [BAR]  
T[1]=40 [C]  
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]=10.55 [BAR]  
S[2]=s[1]  
H[2]=Enthalpy(Isobutane,P=P[2],S=S[2])  
T[2]=Temperature(Isobutane,P=P[2],S=S[2])  
V[2]=Volume(Isobutane,P=P[2],S=S[2])  
X[2]=Quality(Isobutane,P=P[2],S=S[2])

Hr[2]=H[1]+((H[2]-H[1])/Nb)  
Sr[2]=Entropy(Isobutane,H=Hr[2],P=P[2])  
Tr[2]=Temperature(Isobutane,H=Hr[2],P=P[2])  
Vr[2]=Volume(Isobutane,P=P[2],S=Sr[2])  
Xr[2]=Quality(Isobutane,P=P[2],H=Hr[2])

"B) EN EL PRECALENTADOR"

"ESTADO 3"

P[3]=P[2]  
X[3]=0  
H[3]=Enthalpy(Isobutane,P=P[3],X=X[3])



$S[3]=\text{Entropy}(\text{Isobutane},P=P[3],X=X[3])$   
 $V[3]=\text{Volume}(\text{Isobutane},P=P[3],X=X[3])$   
 $T[3]=\text{Temperature}(\text{Isobutane},P=P[3],X=X[3])$

### "C) EN EL VAPORIZADOR"

#### "ESTADO 4"

$P[4]=P[3]$   
 $X[4]=1$   
 $H[4]=\text{Enthalpy}(\text{Isobutane},P=P[4],X=X[4])$   
 $V[4]=\text{Volume}(\text{Isobutane},P=P[4],X=X[4])$   
 $S[4]=\text{Entropy}(\text{Isobutane},P=P[4],X=X[4])$   
 $T[4]=\text{Temperature}(\text{Isobutane},P=P[4],X=X[4])$

### "D) EN LA TURBINA "

#### "ESTADO 5"

$P[5]=P[1]$   
 $S[5]=S[4]$   
 $H[5]=\text{Enthalpy}(\text{Isobutane},P=P[5],S=S[5])$   
 $T[5]=\text{Temperature}(\text{Isobutane},P=P[5],S=S[5])$   
 $V[5]=\text{Volume}(\text{Isobutane},P=P[5],S=S[5])$   
 $X[5]=\text{Quality}(\text{Isobutane},P=P[5],S=S[5])$   
 $Hr[5]=H[4]-Nt*(H[4]-H[5])$   
 $Sr[5]=\text{Entropy}(\text{Isobutane},H=Hr[5],P=P[5])$   
 $Tr[5]=\text{Temperature}(\text{Isobutane},H=Hr[5],P=P[5])$   
 $Vr[5]=\text{Volume}(\text{Isobutane},H=Hr[5],P=P[5])$   
 $Xr[5]=\text{Quality}(\text{Isobutane},H=Hr[5],P=P[5])$

### "E) FLUJO DE MASA DEL ISOBUTANO"

$W_{\text{turbina}}=(H[4]-Hr[5])$   
 $W_{\text{bomba}}=(Hr[2]-H[1])$   
 $m_{FT}=We/(W_{\text{turbina}}-W_{\text{bomba}})$   
 $Tb=T[3]+Tpp$   
 $m_{FG}=(m_{FT}*(H[4]-H[3]))/(c_{FG}*(Ta-Tb))$

### "F) EN EL CONDENSADOR"

$Hx=\text{Enthalpy}(\text{Water},P=P_x,T=T_x)$   
 $Sx=\text{Entropy}(\text{Water},P=P_x,T=T_x)$   
 $Vx=\text{Volume}(\text{Water},P=P_x,T=T_x)$



$$X_x = \text{Quality}(\text{Water}, P = P_x, T = T_x)$$

$$P_y = P_x - P_{xy}$$

$$H_y = (m_{FT} * (H_r[5] - H[1])) / m_{AE} + H_x$$

$$T_y = \text{Temperature}(\text{Water}, P = P_y, H = H_y)$$

$$S_y = \text{Entropy}(\text{Water}, P = P_y, H = H_y)$$

$$V_y = \text{Volume}(\text{Water}, P = P_y, H = H_y)$$

$$X_y = \text{Quality}(\text{Water}, P = P_y, H = H_y)$$

#### "G) PARAMETROS DE ENTRADA AL EVAPORADOR (FLUIDO GEOTERMICO)"

$$H_a = \text{Enthalpy}(\text{Water}, T = T_a, P = P_a)$$

$$S_a = \text{Entropy}(\text{Water}, T = T_a, P = P_a)$$

$$X_a = \text{Quality}(\text{Water}, P = P_a, T = T_a)$$

$$V_a = \text{Volume}(\text{Water}, T = T_a, P = P_a)$$

#### "H) PARAMETROS DE SALIDA DEL EVAPORADOR O ENTRADA AL PRECALENTADOR (FLUIDO GEOTERMICO)"

$$X_b = 0$$

$$H_b = \text{Enthalpy}(\text{Water}, T = T_b, X = X_b)$$

$$S_b = \text{Entropy}(\text{Water}, T = T_b, X = X_b)$$

$$P_b = \text{Pressure}(\text{Water}, T = T_b, X = X_b)$$

$$V_b = \text{Volume}(\text{Water}, T = T_b, X = X_b)$$

#### "I) PARAMETROS DE SALIDA DEL PRECALENTADOR (FLUIDO GEOTERMICO)"

{DOS MANERAS DE HALAR "Tc"}

$$\{T_c = T_a - (H[4] - H[2]) / (H[4] - H[3]) * (T_a - T_b)\}$$

$$T_c = T_b - (m_{FT} * (H[3] - H[2]) / (m_{FG} * c_{FG}))$$

$$X_c = 0$$

$$H_c = \text{Enthalpy}(\text{Water}, T = T_c, x = x_c)$$

$$S_c = \text{Entropy}(\text{Water}, T = T_c, x = x_c)$$

$$P_c = \text{Pressure}(\text{Water}, T = T_c, x = x_c)$$

$$V_c = \text{Volume}(\text{Water}, T = T_c, X = X_c)$$

#### "POTENCIA DE LA BOMBA DE CONDENSADO"

$$P_{\text{bomba}} = m_{FT} * W_{\text{bomba}}$$

#### "POTENCIA DE LA TURBINA"

$$P_{\text{turbina}} = m_{FT} * W_{\text{turbina}}$$



"POTENCIA NETA"

$$P_{\text{neta}} = P_{\text{turbina}} - P_{\text{bomba}}$$

"POTENCIA DE GENERACION"

$$P_{\text{generacion}} = P_{\text{neta}} * N_m * N_{\text{gen}}$$

"CALOR TRANSFERIDO AL FLUIDO DE TRABAJO"

$$Q_{\text{FT}} = m_{\text{FT}} * (H_{[4]} - H_{r[2]})$$

"EFICIENCIA TERMICO DEL CICLO"

$$\text{ETA}_{\text{ciclo}} = P_{\text{generacion}} / Q_{\text{FT}} * 100$$