

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



**“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”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**RONALD PERALTA QUILLA**

**ROLANDO EFRAIN MIRANDA RODRIGUEZ**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2017**

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

“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”

TESIS PRESENTADA POR:

RONALD PERALTA QUILLA  
ROLANDO EFRAIN MIRANDA RODRIGUEZ

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 – 10 – 2017

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



PRESIDENTE:

Ing. ROBERTO JAIME QUIROZ SOSA

PRIMER MIEMBRO:

Ing. JESUS VIDAL LOPEZ FLORES

SEGUNDO MIEMBRO:

Ing. FELIPE CONDORI CHAMBILLA

DIRECTOR / ASESOR:

Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

PUNO – PERÚ

2017

ÁREA : ENERGÍAS RENOVABLES  
TEMA : ENERGÍA GEOTÉRMICA

## DEDICATORIA

A Dios por guiar nuestros pasos para cumplir una de nuestras metas y permitirnos vivir para seguir adelante en el camino hacia el éxito, así también por habernos dado el regalo más grande en la vida que es nuestra familia.

A nuestros padres y hermanos por ser personas únicas en nuestras vidas a las que siempre apreciaremos con todo el corazón, por tenernos la paciencia de enseñarme con amor y aconsejarme cada día de nuestra vida siempre con frases positivas hacia el futuro.

A nuestra querida familia por estar siempre presente brindándome su apoyo y motivándonos para seguir adelante.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por todo el apoyo brindado durante toda nuestra formación académica.

A mi Director de tesis Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON por su apoyo y colaboración en la realización de mi proyecto de investigación y así mismo por las enseñanzas brindadas.

A mis jurados de tesis por la disposición de tiempo para la aprobación de mi proyecto desde el inicio hasta la finalización del mismo.

A mi alma mater, la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Universidad Nacional del Altiplano por haberme brindado los conocimientos y valores para mi vida profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
ÍNDICE DE ANEXOS .....	12
ACRÓNIMOS .....	13
RESUMEN .....	14
CAPITULO I .....	16
1.1 INTRODUCCIÓN .....	16
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
CAPITULO II .....	19
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1. CONSIDERACIONES GENERALES. ....	19
2.1.1. ORIGEN DE LOS SISTEMAS GEOTERMALES.....	19
2.1.2. DEFINICIÓN Y TIPOS DE RECURSOS .....	23
2.1.3. YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS.....	24
2.1.3.1. Yacimientos de Muy Baja Temperatura. ....	25
2.1.3.2. Yacimientos de Baja Temperatura. ....	27
2.1.3.3. Yacimientos de Media Temperatura. ....	29
2.1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS .....	30
2.1.4.1. Yacimientos Geotérmicos de Alta Entalpía .....	30
2.1.4.2. Yacimientos Geotérmicos de Media Entalpía.....	30
2.1.4.3. Yacimientos Geotérmicos de Baja Entalpía .....	31
2.1.4.4. Yacimientos Geotérmicos de Muy Baja Entalpía .....	31

2.2. POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA.....	32
2.2.1. POTENCIAL GEOTÉRMICO MUNDIAL .....	32
2.2.1.1. Generación de Energía Geotérmica en el Mundo .....	32
2.2.1.2. Situación Actual .....	33
2.2.1.3. Potencial Geotérmico Nacional .....	36
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS REGIONES GEOTÉRMICAS.....	40
2.2.2.1. Región V .....	40
2.2.2.2. Región II.....	42
2.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	43
2.3.1. TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS.....	44
2.3.1.1. Sistemas Convectivos Hidrotermales.....	44
2.3.1.2. Sistemas Geotérmicos Mejorados (Enhanced Geothermal Systems). 46	
2.3.1.3. Sistemas Geotérmicos Geopresurizados .....	47
2.3.1.4. Sistemas Marinos.....	47
2.3.1.5. Sistemas Magmáticos .....	47
2.4. GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	48
2.4.1. TIPOS DE CENTRALES DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA.....	48
2.4.1.1. Central Flash o Evaporación Súbita.....	49
2.4.1.2. Central de Vapor Seco .....	50
2.4.1.3. Central de Ciclo Binario.....	51
2.5. EL CICLO DE RANKINE .....	52
2.5.1. FUNCIONAMIENTO DEL CICLO DE RANKINE IDEAL.....	54
2.5.2. APLICACIÓN DE LAS LEYES FUNDAMENTALES.....	55
2.5.2.1. Eficiencia del Ciclo Rankine .....	55
2.5.2.2. Ciclo de Rankine Real.....	60

2.5.2.3. Pérdidas en la Turbina .....	61
2.5.2.4. Pérdidas en la Bomba .....	62
2.6. HIPÓTESIS .....	63
2.6.1. Hipótesis General.....	63
2.6.2. Hipótesis Específicas .....	63
2.7. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	64
2.7.1. Tipo Metodológico.....	64
2.7.2. Metodología de la Investigación .....	64
2.7.3. Técnicas de Recolección de Datos .....	64
2.7.4. Técnicas.....	64
CAPITULO III .....	66
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	66
3.1 MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	66
3.1.1. Tipo de Investigación .....	66
3.1.2. Técnicas de Recolección de Datos.....	67
3.1.3. Técnicas de Análisis de Datos .....	68
3.1.4. Método de la Investigación.....	69
3.1.5. Unidades de Información .....	69
3.1.6. Temperatura de las Aguas Termales de Putina.....	69
3.1.7. Potencial Geotérmico de la Región Puno .....	71
3.1.8. Cantidad de Energía que se Puede Generar .....	72
3.1.9. Implicancias y Obstáculos del Proyecto.....	79
3.1.10. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	79
3.1.11. Recolección de Información para la Investigación .....	80
3.1.12. Procesamiento de Datos.....	80

3.1.13. Variables.....	80
CAPITULO IV.....	81
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	81
4.1 TEMPERATURA DE LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA .....	81
4.2 POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA REGIÓN PUNO .....	83
4.3 CANTIDAD DE ENERGIA QUE SE PUEDE GENERAR.....	91
4.4 IMPLICANCIAS Y OBSTÁCULOS DEL PROYECTO.....	98
CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES .....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dorsales oceánicas y las fosas abisales.....	20
Figura 2: Placas litosféricas. ....	22
Figura 3: La radiación solar y las condiciones climáticas.....	27
Figura 4: Sistema de calefacción urbana de Boise, Idaho, EE.UU. ....	29
Figura 5: Clasificación de la energía geotérmica según su entalpía. ....	31
Figura 6: Mapa tectónico y su relación con la geotermia. ....	34
Figura 7: Regiones con potencial geotérmico a nivel nacional.....	38
Figura 8: Identificación de los campos geotermiales en la zona sur del Perú...	42
Figura 9: Diagrama de una central de evaporación súbita o flash. ....	50
Figura 10: Diagrama de una central de vapor seco. ....	51
Figura 11: Diagrama de una central de ciclo binario. ....	52
Figura 12: Régimen permanente flujo estable del ciclo de Rankine simple. ....	53
Figura 13: Diagrama T-s del ciclo idealizado según el esquema. ....	54
Figura 14: Esquema del ciclo Rankine de control para el análisis energético..	58
Figura 15: Diagrama temperatura-entropía y el efecto de las ineficiencias.....	63
Figura 16: Ubicación geográfica del sitio de experimentación. ....	71
Figura 17: Diagrama de Pareto valores de temperatura Putina. ....	83
Figura 18: Temperatura Promedio de las fuentes termales de Puno. ....	84
Figura 19: Temperatura Promedio de las principales fuentes termales de Puno. .....	91
Figura 20: Diagrama T-S.....	92
Figura 21: T-H del isobutano.....	92
Figura 22: Turbina y generador del ciclo binario. ....	95

Figura 23: Bomba de condensado del ciclo binario..... 95

Figura 24: Pre calentador y evaporador del ciclo binario. .... 96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Países con mayor utilización de la energía geotérmica .....	36
Tabla 2: Lotes geotérmicos identificados para la explotación .....	39
Tabla 3: Registro de datos obtenidos de temperatura. ....	70
Tabla 4: Registro coordenadas. ....	71
Tabla 5: Registro de temperaturas de cada fuente. ....	72
Tabla 6: Técnicas e Instrumentos .....	80
Tabla 7: Ubicación de la fuente geotermal de Putina.....	82
Tabla 8: Valores de temperatura Fuente Termal Putina .....	82
Tabla 9: Principales lugares geotérmicos de la Región Puno. ....	83
Tabla 10: Valores de temperatura Fuente Termal Cuyo Cuyo. ....	85
Tabla 11: Ubicación Fuente Termal Cuyo Cuyo.....	85
Tabla 12: Valores de temperatura Fuente Termal Huaylluma.....	86
Tabla 13: Ubicación Fuente Termal Huaylluma. ....	86
Tabla 14: Valores de temperatura Fuente Termal Pasanacollo. ....	87
Tabla 15: Ubicación Fuente Termal Pasanacollo. ....	87
Tabla 16: Valores de temperatura Fuente Termal Ollachea. ....	88
Tabla 17: Ubicación Fuente Termal Ollachea. ....	88
Tabla 18: Valores de temperatura Fuente Termal Loripongo.....	89
Tabla 19: Ubicación Fuente Termal Loripongo. ....	89
Tabla 20: Valores de temperatura Fuente Termal Puente Bello. ....	90
Tabla 21: Ubicación Fuente Termal Puente Bello.....	90
Tabla 22: Propiedades del Isobutano a diferentes Temperaturas.....	93

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Programa Utilizado EES Ver. 6883 .....	106
ANEXO B: Resultados del Programa EES Ver. 6883 .....	107
ANEXO C: Ficha Técnica del ISOBUTANO (R600a) .....	108
ANEXO D: Panel de Fotografías .....	110

## ACRÓNIMOS

$m$  = Flujo de masa, kg/s.

$h$  = Entalpía, kJ/kg.

$P$  = Presión, kPa.

$s$  = Entropía, kJ/kg°C.

$u$  = Volumen específico, m<sup>3</sup>/kg.

$T$  = Temperatura, °C.

$u$  = Energía interna, kJ/kg.

$\eta_{ab}$  = Eficiencia adiabática de la bomba de condensado, sin unidades.

$W_B$  = Potencia de la bomba, kW.

$\eta_b$  = Eficiencia de la bomba de condensado, sin unidades.

$W_T$  = Potencia de la turbina, kW.

$\eta_T$  = Eficiencia de la turbina, sin unidades.

$\eta_m$  = Eficiencia mecánica, sin unidades.

$\eta_g$  = Eficiencia del generador, sin unidades.

$W_e$  = Potencia eléctrica, kW.

## RESUMEN

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.

**Palabras clave:** fuente geotermal; temperatura; geotermometria, ciclo binario.

## ABSTRACT

The present thesis project general objective is to carry out a descriptive research to see if it is feasible to taking advantage of the thermal waters of Putina - Puno, for small power electric power generation; the technical assessment to determine the possibility of the use of the geothermal resource occurring in the bathrooms of Putina of the province of San Antonio de Putina, which presents an average geo thermometry of 62° C, because of this you choose to cycle binary, using ISO-butane as the working fluid taking into account their physical properties chemical, the calculation has been used EES software version 6.883. The research project was organized in the following way: in the first place was carried out a thorough investigation of the literature pertaining to geothermal systems. There has been the identification of the most important geothermal sources of the Department, the analysis of the implications and obstacles that presents the realization of this project, in order thus to meet the objectives mentioned above, the main contribution of this research focuses on the amount of electrical energy that can be generated from low-temperature geothermal sources.

**Key words:** geothermal source; temperature; geo thermometry, binary cycle.

## CAPITULO I

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación nos muestra la posibilidad de realizar 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 estudio planteado, ha sido elegido por la relevancia e importancia que representa para la población y el conocimiento que puede aportar el presente proyecto de investigación así mismo parte de este análisis es realizar el diagnóstico y el levantamiento de información de la condición actual y la medida.

El aprovechamiento de la energía geotérmica mediante ciclos binarios viene utilizándose décadas atrás, datando del 1967 en Nueva Zelanda. Se adopta este tipo de tecnología cuando la temperatura del recurso no es muy elevada, es decir, en los yacimientos de media temperatura, o cuando las condiciones del

fluido geotérmico no son los más aptos para el contacto directo con los mecanismos de la planta; y se emplea un fluido secundario de carácter orgánico en el ciclo de potencia, y por ello se le denomina Ciclo de Rankine Binario (CRB).

Los CRB's emplean el mismo principio de funcionamiento que un ciclo de Rankine convencional, pero al emplear un fluido orgánico presentan características específicas que permiten simplificar el ciclo, conduciendo a equipos mucho más compactos.

Hoy en día las centrales de ciclo binario son el tipo de planta geotérmica más utilizado para generar electricidad. Existen 155 unidades de ciclo binario en operación, generando 274 MW de electricidad en 16 países. Sin embargo, a pesar 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, 2015)

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

El proyecto 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.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Identificar la temperatura de las Aguas Termales De Putina – Puno.
- b) Estimar el potencial geotérmico en la región de Puno, Identificar la cantidad de energía eléctrica que se podría generar, Evaluar las implicancias u obstáculos que pueda presentar dicho proyecto.

## CAPITULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA

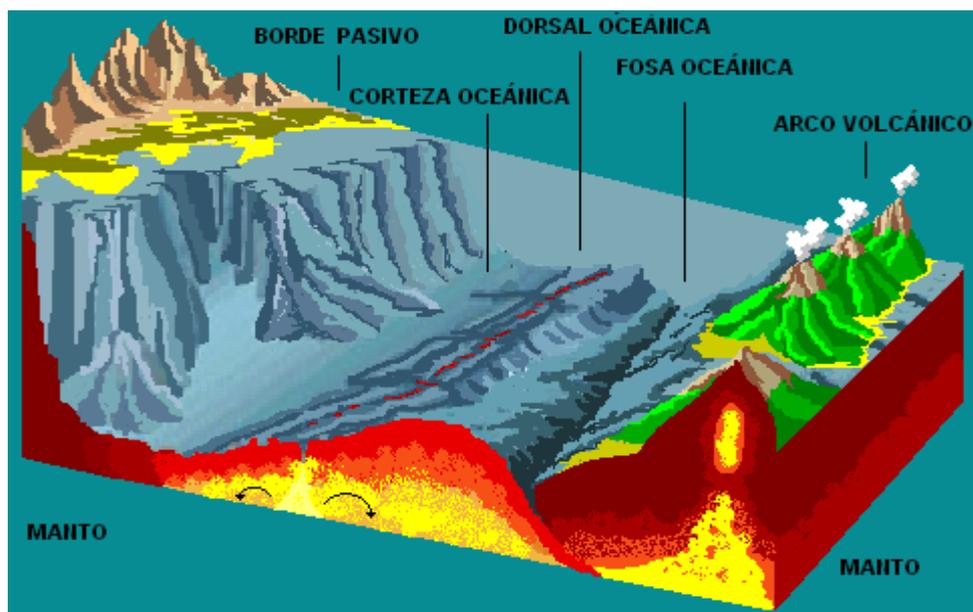
En el presente capítulo se desarrolla la revisión bibliográfica para dar a conocer los conceptos básicos sobre la energía geotérmica.

#### 2.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

##### 2.1.1. Origen de los sistemas geotermiales.

La tierra está formada por tres capas concéntricas: la más externa, denominada corteza terrestre, tiene un espesor de unos 35 km. bajo los continentes y menos de 10 km. en los océanos. Debajo de ella, y hasta aproximadamente los 2900 km. de profundidad, se encuentra el manto de composición ultra básica y por último el núcleo, el cual se supone de naturaleza metálica. Figura 1.

Es indudable que la tierra no se comporta como un cuerpo rígido, sino que se halla sometida a grandes cambios y transformaciones, los continentes están en movimiento constante, a la vez que el fondo de los océanos está en continua expansión.

**Figura 1: Dorsales oceánicas y las fosas abisales.**

Fuente: previa.uclm.es

Las dorsales oceánicas son extensas cordilleras submarinas, construidas con materiales volcánicos, que tienen en su parte central una fosa o rift en constante expansión a través de la cual se produce el ascenso de materiales fundidos procedentes del manto, los que originan la corteza oceánica. Las dorsales oceánicas forman un sistema continuo que se extiende por más de 50.000 km. de longitud y son zonas de numerosos terremotos y erupciones volcánicas.

Las fosas abisales son grandes depresiones de los fondos oceánicos de poco ancho y gran longitud. La profundidad de estas fosas supera los 6000 metros.

Asociadas a ella aparecen los arcos insulares, con importante actividad volcánica y las cadenas montañosas de edad reciente.

Debe señalarse además que las dorsales oceánicas aparecen cortadas transversalmente por grandes fallas, denominadas de transformación, que las dividen en segmentos desplazados unos respecto a otros.

El conocimiento de estas estructuras condujo a la formulación de la teoría conocida como "Tectónica de Placas" o "Tectónica Global"; según esta teoría, la parte más externa de la tierra (la corteza terrestre y el manto superior) estaría formada por un reducido número de fragmentos de esfera, denominados placas, en continuo movimiento.

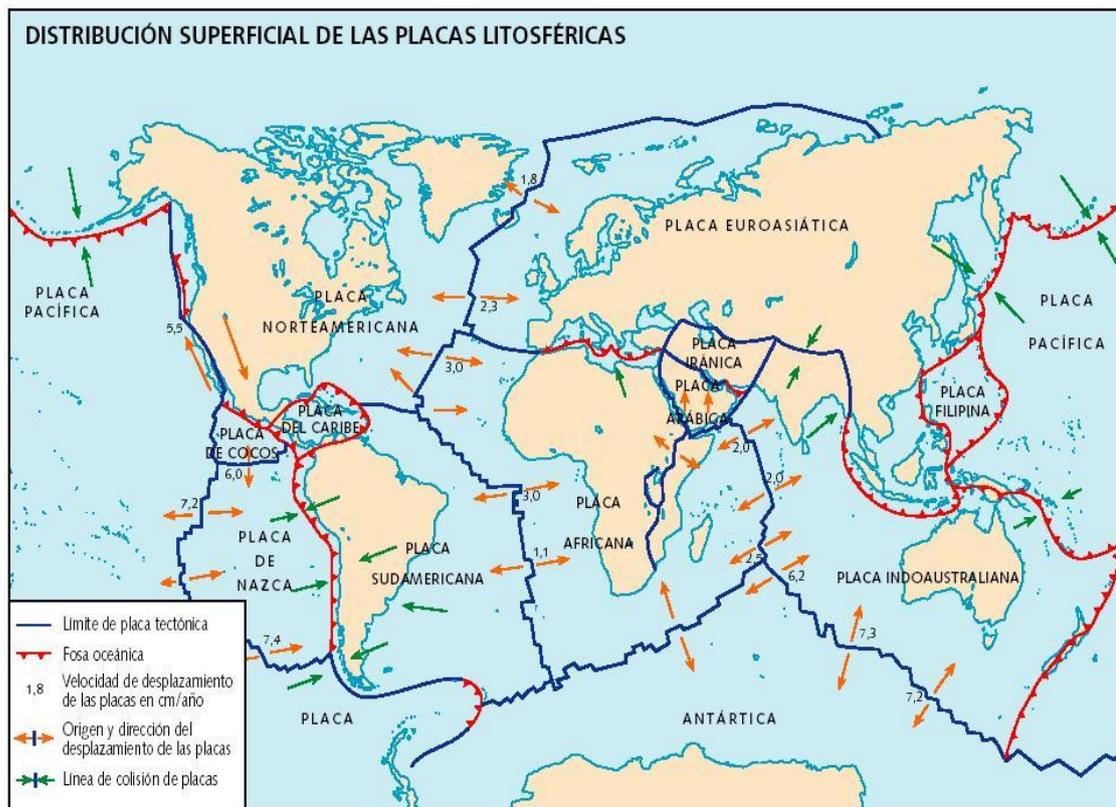
Los límites de estas placas son las dorsales oceánicas, las fosas abisales y las fallas de transformación.

En las primeras se produce el movimiento divergente de las placas, como consecuencia del ascenso de material fundido procedente del manto, en tanto que las fosas abisales son las zonas donde dos placas chocan hundiéndose una debajo de la otra y reabsorbiéndose en el manto. Estas zonas se conocen como Zonas de Subducción.

En las fallas de transformación las placas se deslizan unas a lo largo de las otras.

Sobre la superficie terrestre se existen seis grandes placas: Pacífica, Norteamericana, Eurasiática, Africana, Sudamericana e Indo australiana, Fig.2.

Figura 2: Placas litosféricas.



Fuente: (www.biologiasur.org)

En los bordes o límites de estas placas se producen los principales procesos geológicos: se forman los grandes sistemas montañosos, hay terremotos, fenómenos volcánicos y es allí donde están las principales áreas geotérmicas del mundo.

La fuerza impulsora del movimiento de las placas se atribuye a grandes movimientos de materia, denominados corrientes de convección, originados como consecuencia de la variación de sus densidades con las altas temperaturas, a la energía liberada durante el decaimiento radioactivo de ciertos elementos en el interior de la tierra y el calor liberado durante los cambios de fase de los materiales en el manto. (SIERRA, 1998).

### 2.1.2. Definición y tipos de recursos

Recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es actual o potencialmente posible.

Esta definición está en consonancia con la que se utiliza en los sectores mineros y de hidrocarburos para recurso mineral: “concentración de materiales sólidos, líquidos o gaseosos que existen en forma natural en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción económica es actual o potencialmente posible”.

Sólo difieren en la expresión “en forma natural” toda vez que hay, o puede haber en el futuro, explotaciones que aprovechan calor del subsuelo que no es de origen natural, sino provocado por la acción humana.

Entre estos últimos se encuentran el calor que se evacua al terreno en verano por los sistemas de intercambio de calor que utilizan bombas de calor geotérmicas, y el calor que se puede recuperar en túneles, ferroviarios o de carreteras, y en galerías y túneles de minas subterráneas que explotan sulfuros metálicos expuestos a procesos exotérmicos de oxidación.

No sería el calor de las aguas que se infiltran por sus paredes, que al fin y al cabo son de origen natural, sino el de las instalaciones de ventilación forzada con aire, necesarias para la explotación comercial de los primeros y para la explotación de minerales en los segundos. En ambos casos el calor es un subproducto que es necesario evacuar.

Con respecto a la definición de energía geotérmica, añade la condición de que el calor en el subsuelo pueda ser extraído económicamente en la actualidad

o en el futuro. No cifra la cuantía de ese futuro, y no presupone que los medios para su explotación estén disponibles.

El concepto de recurso geotérmico es tan amplio que engloba desde el calor que se puede encontrar en los horizontes más superficiales del suelo, para los que el calor que proviene del interior de la Tierra tiene una importancia insignificante, pues es el propio suelo el que actúa como una masa térmica que absorbe energía solar, hasta el calor almacenado en rocas situadas a las profundidades que se podrían alcanzar con técnicas de perforación de pozos petrolíferos, que actualmente son de unos 10 km. El sondeo más profundo, más de 12 km, ha sido perforado en la Península de Kola, en Rusia.

Con la tecnología disponible hoy en día para la explotación de la energía geotérmica, se pueden alcanzar y, posteriormente, captar recursos geotérmicos hasta 5.000 m de profundidad y que no superen los 400 °C de temperatura.

Por lo que respecta a los tipos de recursos geotérmicos, se adopta la clasificación basada en el nivel de temperatura, con los mismos intervalos que se han utilizado anteriormente para la energía geotérmica:

- a) Recursos de muy baja temperatura: menos de 30 °C.
- b) Recursos de baja temperatura: entre 30 y 90 °C.
- c) Recursos de media temperatura: entre 90 y 150 °C.
- d) Recursos de alta temperatura: más de 150 °C.

### **2.1.3. Yacimientos geotérmicos.**

Cuando en un área geográfica concreta se dan determinadas condiciones geológicas y geotérmicas favorables para que se puedan explotar de forma económica los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que allí existe un

yacimiento geotérmico. Las condiciones no son las mismas para cada uno de los cuatro tipos de recursos geotérmicos que se han mencionado en el apartado anterior.

Los yacimientos geotérmicos pueden ser clasificados conforme a diferentes criterios: el contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización.

La clasificación más común es la del nivel de temperatura, y es la que se ha tenido en cuenta, con los mismos intervalos de temperatura anteriores, para describir en los apartados siguientes algunos aspectos importantes de cada tipo de yacimiento.

#### **2.1.3.1. Yacimientos de muy baja temperatura.**

Prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja temperatura, menos de 30 °C, que se ve interrumpido por la presencia de masas de agua continentales o marinas.

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, o en acuíferos poco profundos, para climatización de casas individuales y edificios por intermedio de bombas de calor geotérmicas. La superficie del suelo intercambia calor con la atmósfera y sufre las variaciones diarias de temperatura hasta una profundidad de 0,5 m.

A pocos metros de profundidad, la temperatura permanece relativamente estable, entre 7 y 13 °C, si se la compara con la temperatura ambiente en

superficie. Ello es debido al calor recibido del Sol, que calienta la corteza terrestre especialmente en verano, y a la gran inercia térmica de suelos y rocas.

Las variaciones estacionales de temperatura son perceptibles en el terreno hasta una profundidad de alrededor de 10 m. A partir de 10 m de profundidad y con poca circulación de agua subterránea, el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe y mantenerlo incluso estacionalmente, de forma que el terreno permanece a una temperatura prácticamente constante durante todo el año.

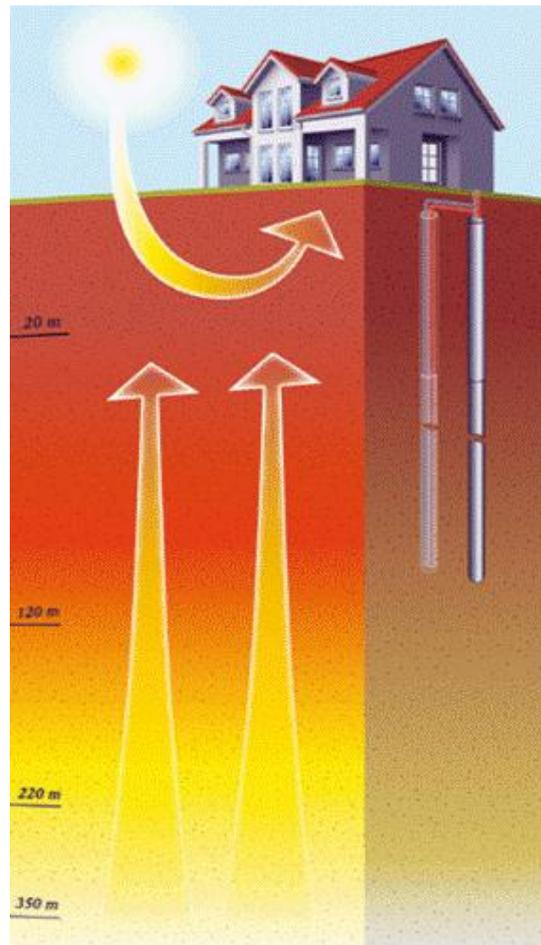
A una profundidad de 15 m se considera que el terreno está a temperatura constante todo el año, con un valor ligeramente superior a la temperatura media anual de la superficie.

Dicho valor depende del clima, de la vegetación, de la cobertura del suelo, de su pendiente, de la cantidad de nieve y de las propiedades generales del suelo.

A partir de 15 m de profundidad, la temperatura de las rocas, que reciben el calor terrestre que remonta de las profundidades, no depende de las variaciones estacionales de temperatura, ni del clima, sólo de las condiciones geológicas y geotérmicas.

Por debajo de 20 m de profundidad, la temperatura aumenta a razón de unos 3 °C cada 100 m como consecuencia del gradiente geotérmico.

En la mayor parte de las regiones del planeta, las rocas se encuentran a una temperatura de 25 – 30 °C a 500 m de profundidad.

**Figura 3: La radiación solar y las condiciones climáticas.**

Fuente: (<https://es.slideshare.net/ehabilita/gua-de-la-energa-geotrmica>)

### 2.1.3.2. Yacimientos de baja temperatura.

Los Yacimientos geotérmicos de baja temperatura, entre 30 y 90 °C, pueden encontrarse en cuencas sedimentarias en las que el gradiente geotérmico sea el normal o ligeramente superior. La única condición geológica requerida es la existencia a profundidad adecuada, entre 1.500 y 2.500 m, de formaciones geológicas permeables, capaces de contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor de las rocas.

Con un gradiente geológico normal, de alrededor de 3 °C cada 100 m, a una profundidad de 2.000 m, la temperatura puede alcanzar 70 °C o más.

Anteriormente se comentó que una de las mayores fuentes de calor terrestre era la desintegración de isótopos radiactivos presentes en las rocas. Ese calor varía con la composición química y con la edad de las rocas, razón por la cual, los gradientes geotérmicos son más elevados en cuencas sedimentarias jóvenes que en zócalos antiguos.

Existen yacimientos geotérmicos de baja temperatura en numerosas regiones del planeta: Cuenca del Amazonas y del Río de la Plata en América del Sur, Región de Boise (Idaho) y Cuenca del Mississippi – Missouri en América del Norte, Cuenca Artesiana de Australia, la Región de Pekín y de Asia Central, las cuencas de París y Aquitania en Francia, la Cuenca Panónica en Hungría, etc.

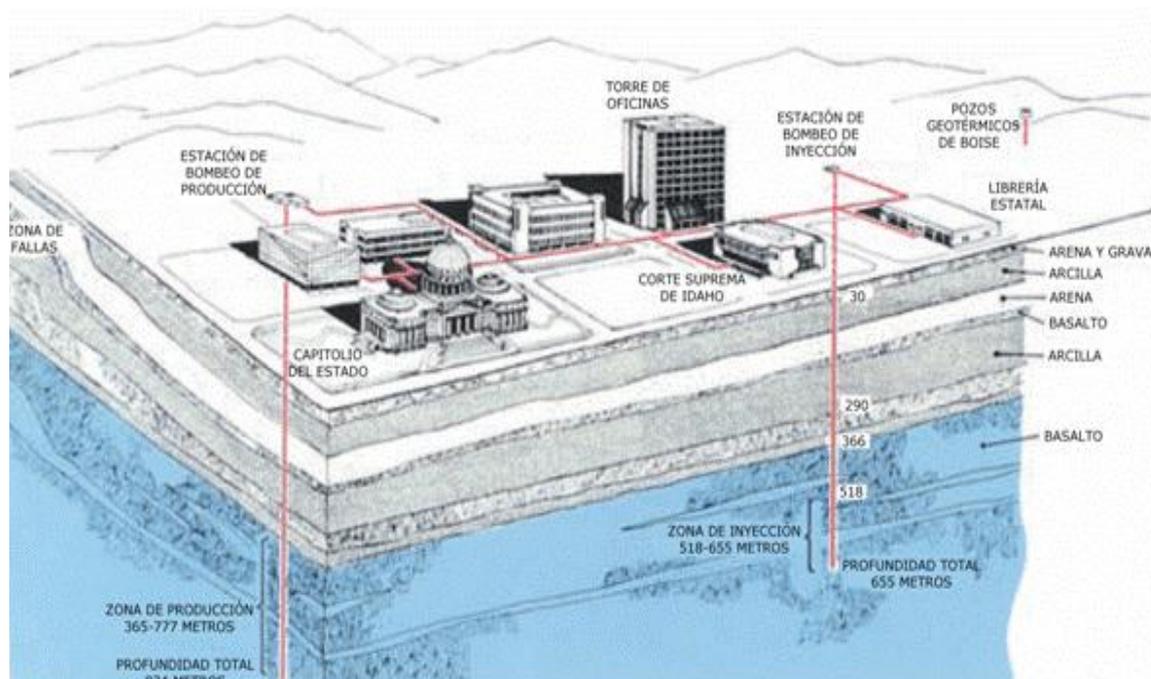
La Cuenca Panónica está rellena de materiales procedentes de la erosión de las montañas circundantes de edad Alpina. El gradiente geotérmico es de 5 – 6 °C cada 100 m.

La Cuenca de París está formada por un apilamiento de capas sedimentarias depositadas en el transcurso de las tres últimas eras geológicas, sobre un zócalo cristalino o granítico más antiguo. Se explotan cinco acuíferos geotérmicos en diferentes capas de sedimentos. El más explotado es el de calizas del Dogger en la región de Ile de France, que se extiende sobre una superficie de 15.000 km<sup>2</sup> y proporciona agua a temperaturas que varían entre 56 y 85 °C desde profundidades de 1.800 a 2.000 m.

Otro ejemplo de este tipo de yacimientos es el de Boise (Idaho, EE. UU.), cuya primera red de calefacción a distancia entró en funcionamiento en 1892. Actualmente, los edificios del Capitolio, Juzgados y 40 edificios comerciales más, tienen calefacción con agua geotermal a una temperatura de unos 80 °C, que se

extrae por varios pozos desde 268 – 580 m de profundidad, y se inyecta por otro pozo situado a 1,6 km al suroeste del campo de pozos de producción, Figura 4.

**Figura 4: Sistema de calefacción urbana de Boise, Idaho, EE.UU.**



Fuente: (<https://es.slideshare.net/ehabilita/gua-de-la-energa-geotrmica>)

### 2.1.3.3. Yacimientos de media temperatura.

Los Yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas comprendidas entre 90 y 150 °C se encuentran en numerosos lugares del planeta: en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a profundidades comprendidas entre 2.000 y 4.000 m; en zonas de adelgazamiento litosférico; en zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos; o en los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta temperatura, pero a menos profundidad, menos de 1.000 m.

#### **2.1.4. Clasificación de los yacimientos geotérmicos**

Los yacimientos geotérmicos se clasifican usualmente considerando el nivel energético de los fluidos en ellos contenidos y sus posibles formas de utilización.

No existe una estandarización con respecto a los límites donde empieza y termina un recurso de alta, mediana, baja o muy baja entalpía. Tomando en cuenta la clasificación propuesta por (Muffler y Cataldi, 1978) se tiene:

##### **2.1.4.1. Yacimientos geotérmicos de alta entalpía**

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

##### **2.1.4.2. Yacimientos geotérmicos de media entalpía**

Su temperatura se encuentra entre los 90 y 150 °C. Se sitúan a profundidades inferiores a 1000 metros, en zonas con un gradiente geotérmico elevado. Se aprovechan en centrales de generación eléctrica con ciclos binarios, a través de la utilización de un fluido intermedio de menor temperatura de vaporización.

También pueden ser utilizados para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y en procesos industriales.

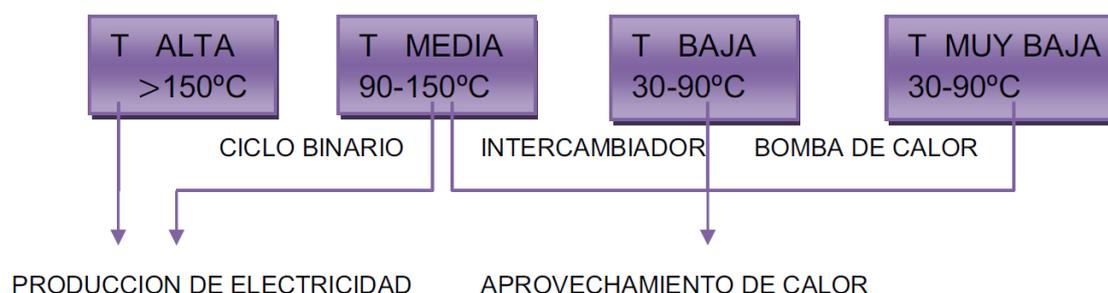
#### 2.1.4.3. Yacimientos geotérmicos de baja entalpía

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

#### 2.1.4.4. Yacimientos geotérmicos de muy baja entalpía

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

**Figura 5: Clasificación de la energía geotérmica según su entalpía.**



Fuente: (LARA, 2011).

## **2.2. POTENCIAL DE ENERGIA GEOTERMICA**

### **2.2.1. Potencial Geotérmico Mundial**

Las áreas geológicas de gran actividad tectónica son las zonas donde la placa oceánica de la tierra y la de la corteza chocan y se monta una sobre la otra (zona de subducción). Estas áreas bordean el Océano Pacífico y corresponden a la cordillera de Los Andes (América del Sur), los volcanes de América Central y México, la Cordillera Cascade de USA y Canadá, la cordillera Aleutian de Alaska, la Península de Kamchatka en Rusia, Japón, las Filipinas, Indonesia y Nueva Zelanda.

Donde las placas tectónicas se están fragmentando es otra zona energética activa (Islandia, los valles de África, la zona del Atlántico medio y las Provincia de Cordilleras y bases de USA); y los sectores llamados "puntos calientes", que son lugares fijos en la Tierra que producen magma frecuentemente y dan origen a manantiales y volcanes, como la cadena de las Islas Hawaii.

En cuanto a los países productores, los que están generando más electricidad en base a recursos geotérmicos son Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda, Italia, México, las Filipinas, Indonesia y Japón. Sin embargo, existen países con alta actividad tectónica que debieran producir y utilizar la energía geotérmica. (Energía geotérmica: Calor generado por la Tierra, 2004).

#### **2.2.1.1. Generación de energía geotérmica en el mundo**

Cada vez suscita mayor interés y preocupación a nivel mundial y especialmente en los países desarrollados, buscar opciones de producción de energías renovables que causen el mínimo de contaminación y que en no

aporten más gases, como CO<sub>2</sub> y otros, para disminuir el efecto invernadero. Por otra parte, en algunos países pobres en hidrocarburos y carbón de alta capacidad calórica en Europa Central (Italia), Asia (Indonesia, Filipinas, Japón) y Centroamérica (Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Guatemala); la Geotermia ha jugado un rol muy importante en disminuir esta dependencia. (Soffia J.M., Ramírez C., 2004)

### **2.2.1.2. Situación Actual**

En resumen, a nivel mundial la energía geotérmica aporta el doble de la contribución que hacen las energías renovables tradicionales combinadas como la biomasa, eólica, solar, térmica y fotovoltaico; y sigue estando disponible cuando no alumbra el sol y cuando no sopla el viento.

Esta fuente o energía disminuye la dependencia que hoy día hay en los combustibles fósiles y de otros recursos que se encuentran en el mundo que son y no suelen ser renovables. Uno de los factores de la importancia de la energía geotérmica para nuestro futuro y tener un ecosistema más sano es que los residuos que produce ocasionan un impacto mínimo, ya que no contaminan como lo hacen el carbón y el petróleo. También proporciona un sistema de mayor ahorro tanto energético como económico.

Son irrefutablemente inagotables los recursos geotérmicos a la escala humana y no proporciona residuos exteriores. Tampoco esta energía está sujeta a precios internacionales más bien suele mantenerse a precios locales o nacionales. Es menor por megavatio a otro tipo de plantas el área de terreno que se requiere para las plantas geotérmicas. Mucho menos construcción de represas como tampoco tala de bosques. Es inferior la emisión de CO<sub>2</sub>, que se

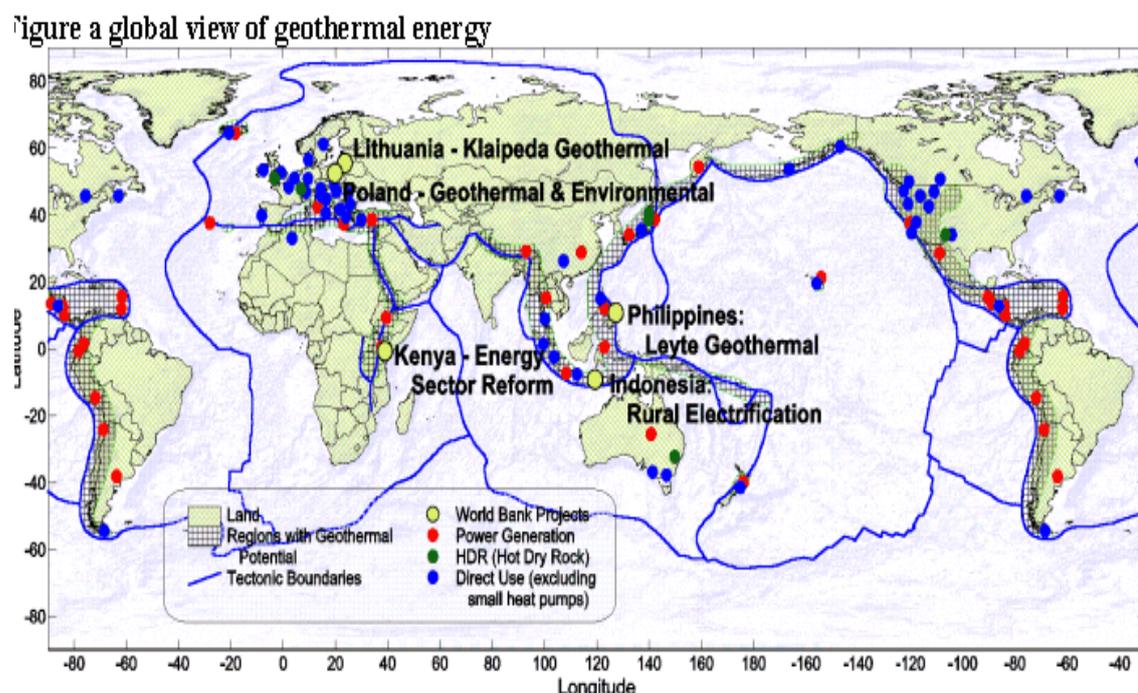
emitirá para obtener energía igual por combustible, y cuando se reinyecta el agua puede llegar a ser nula, logrando que circule por el exterior en un circuito cerrado.

La potencia instalada mundial de energía geotérmica se estima actualmente en casi 9.000 MW instalados y varios proyectos en ejecución. Se dispone de 80 reservorios geotermales identificados que se explotan a través de 250 plantas geotermoeléctricas sirviendo a 60 millones de habitantes. (Soffia J.M., Ramírez C., 2004)

Los países con mayor utilización de la energía geotérmica son: Estados Unidos, Filipinas, México, Indonesia, Italia, Japón, Nueva Zelanda. (Ver Cuadro N° 1)

EEUU cuenta con más de una cuarta parte de la potencia de centrales, con una potencia de unos 3.000 MW, electricidad comparable a la producida quemando más de 60 millones de barriles de petróleo al año.

**Figura 6: Mapa tectónico y su relación con la geotermia.**



Fuente: (<http://www.sociedadgeologica.org.gt/index.php/blog/68-antecedentes-de-la-energia-geotermica>)

Filipinas genera el 27% de su electricidad con esta energía, Islandia produce el 17% de sus necesidades de consumo, y Nueva Zelanda es uno de los países que más se destaca por el avance tecnológico en cuanto a esta energía, debido a su particular topografía volcánica.

Por otra parte, Canadá además de las 30.000 instalaciones de energía geotermal para calefacción domiciliaria que posee, recientemente ha construido una planta experimental.

En cuanto al rol que esta energía podría desempeñar, los expertos aseguran que podría ser muy importante para los países en vías de desarrollo, por ejemplo, se prevé que en el este de África se podrían generar hasta 6,5 Giga vatios (GW) de electricidad. Sin embargo, por el momento solo Kenya dispone de una central de esta clase.

En este sentido, el Banco Mundial anunció a fines del 2006 su intención de impulsar este tipo de energías por medio de subvenciones o con la financiación de emisiones de carbono. En cualquier caso, el desarrollo de la tecnología resulta también fundamental para incrementar su uso.

Actualmente, las principales líneas de investigación son la bomba de calor y la roca seca, y el 2006 se informaba de un nuevo sistema para aprovechar un estado especial de los fluidos (estado supercrítico), al estar sometidos a presión y temperatura muy altas. (Fernández, 2006).

**Tabla 1: Países con mayor utilización de la energía geotérmica**

PAÍS	POTENCIA INSTALADA (MW)
Estados Unidos	2.85
Filipinas	1.931
México	953
Indonesia	797
Italia	790
Japón	535
Nueva Zelanda	435
Islandia	202
Costa Rica	163
El Salvador	151
Kenya	127
Rusia	79
Nicaragua	77
Guatemala	33
China (Tibet)	28
Turquía	20
Portugal (Azores)	16
Francia (Guadalupe)	15
Papua Nueva Guinea	6
Tailandia	0,3
Austria	0,2
Alemania	0,2
Australia	0,2
Total	9.209

Fuente: Geothermal Energy

**2.2.1.3. POTENCIAL GEOTÉRMICO NACIONAL**

La energía geotérmica es un recurso benigno y renovable, que va de acuerdo con el control del medio ambiente y que asegura una buena conservación del mismo. El aprovechamiento de este recurso permitirá tener una fuente más de generación de energía que favorecerá al desarrollo de diversas regiones de extrema pobreza.

La energía geotérmica se puede aplicar en la industria, comercio y el sector domiciliario, para la generación de electricidad o el calentamiento de agua y calefacción de ambientes.

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.

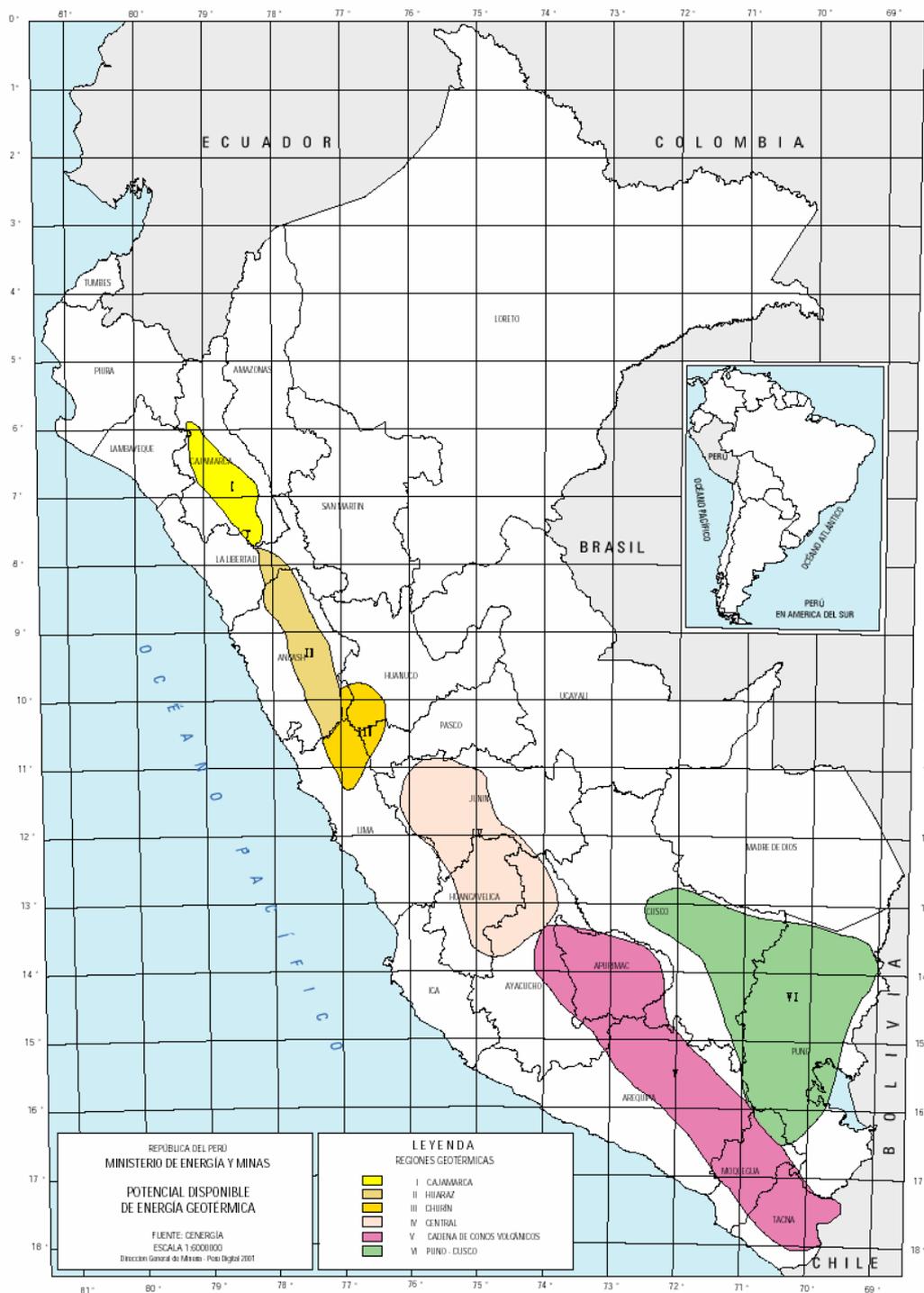
En 1976, Geothermal Energy Research del Japón, efectuó trabajos de exploraciones preliminares en la cuenca del Vilcanota en Cusco

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 (Figura 2.36): (ZAPATA, 2007)

- a) Cajamarca
- b) Huaraz
- c) Churín
- d) Central
- e) Cadena de conos volcánicos
- f) Puno – Cusco

**Figura 7: Regiones con potencial geotérmico a nivel nacional.**



Fuente: (<https://es.slideshare.net/robvaler/evaluacin-del-potencial-geotrmico-en-las-zonas-alto-andinas-de-tacna-presentation>)

“Potencial disponible de Energía Geotérmica”

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 (Tabla 2.3). (ZAPATA, 2007).

**Tabla 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	* Cubrir la demanda de energía eléctrica Cujajone, Quellaveco y el Dpto. de Moquegua
			Na/K	: 240°C	
2	CALACOA	Sierra de Moquegua	SiO <sub>2</sub>	: 110 - 160°C	* Podría cubrir parcialmente los requerimientos del Sistema Eléctrico Tacna-Moquegua * Complejo Minero de Toquepa la Ampliación de Cujajone * Ampliación de Quellaveco * Programas de desarrollo industrial de las futuras inversiones en la región
	CHALLAPALCA	Altiplanicie 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	
3	AREQUIPA	Departamento de Arequipa	SiO <sub>2</sub>	: 170°C	* Instalación de una planta geotérmica mediana (50 MW)
		Lagunas Salinas - Chachani	SiO <sub>2</sub>	: 190°C	
		Laguna Chivay			* Potenciamiento del turismo en el Valle del Colca
		Laguna Cailloma			

Fuente: (ZAPATA, 2007)

En 1979-1980, INGEMMET y AQUATER de Italia efectuaron estudios de reconocimiento geotérmico de la Región V, identificando las áreas de interés

Tutupaca, Calacoa, Challapalca, Salinas, Chachani y Chivay.

En 1980, Geothermal Energy System Ltd. hizo estudios de reconocimiento geotérmico de las zonas de Calacoa, Tutupaca y las Salinas en Moquegua.

En el año 1986, ELECTROPERÚ con asistencia técnica de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) y las Naciones Unidas

realizaron investigaciones geoquímicas en la Región V, entre Tacna y Moquegua.

En 1997, CENERGÍA con el apoyo del IIE de México efectuó la evaluación de la información, estudios disponibles, realizados por INGEMMET, ELECTROPERU, CENERGÍA, Proyecto Especial Tacna, IPEN y la Cooperación Internacional.

El Perú tiene 186 zonas geotérmicas identificadas (39% en Sudamérica)<sup>2</sup>. El territorio peruano forma parte del denominado Círculo de Fuego del Pacífico, caracterizado por la ocurrencia de movimientos sísmicos, fenómenos tectónicos y elevada concentración de flujo tectónico. En el país se han reconocido más de doscientas vertientes de agua caliente, así como fumarolas y algunos geysers. Según los estudio realizados, de acuerdo a la temperatura, las mejores perspectivas de aprovechamiento geotérmico para generación eléctrica se ubican por el momento en la Región V (Conos Volcánicos) y la Región II (Callejón de Huaylas). (ZAPATA, 2007).

## **2.2.2. Características de las Regiones geotérmicas**

### **2.2.2.1. Región V**

#### **a) Calacoa (Moquegua)**

Manantiales de agua termales 54°C - 87°C y presencia de geiser y fumarolas.

Tipo de aguas: Cloruradas sódicas.

Geotermometría: SiO<sub>2</sub>: 110°C-160°C, Na/K: 180°C-190°C

Presencia de domos, volcán Ticsani (apagado) 190000 años.

**b) Tutupaca (Tacna-Moquegua)**

Manantiales de agua termales 40°C - 87°C y presencia de geiseres.

Tipo de aguas: Sulfato sódicas y cálcicas.

Geotermometría: SiO<sub>2</sub>: 180°C, Na/K: 240°C.

Presencia de domos dacíticos y fumarolas lo relacionan con una actividad freatomagmática.

Ubicado entre volcanes Tutupaca y Yuramane (apagado).

**c) Challapalca (Tacna-Puno)**

Manantiales de agua termales 50°C - 87°C

Tipo de aguas: Clorurada sódicas y bóricas.

Geotermometría: SiO<sub>2</sub>: 192°C, Na/K: 182°C-232°C, Na/K/Ca: 184°C-212°C, Na/K/Ca/Mg: 44°C-179°C, Na/Li: 204°C-240°C, K/Mg: 87°C-183°C.

Presencia de domos (domos Purupurini), ponen en evidencia una fuente geotermal poco profunda. Se estima que la actividad volcánica cesó hace 100000 años. (ZAPATA, 2007)

**d) Laguna Salinas-Chivay**

Manantiales de agua termales 45°C a 50°C en Calera y de 60°C a 70 °C en Chivay, además presencia de geiseres.

Tipo de aguas: Sulfato, clorurada alcalina.

Geotermometría: En Chivay SiO<sub>2</sub>: 170°C, en Salinas Na/K: 190°C.

Presencia de domos apagados indican presencia de cámaras magmáticas poco profundas. La actividad volcánica lávica se estima cesó hace 100 000 años.

### 2.2.2.2. Región II

#### a) La Gramma

Tipo de aguas: Clorurada sódicas y bicarbonato cálcico.

Geo termometría: SiO<sub>2</sub>: 210°C, Na/K : 200°C, Na/K/Ca: 180°C.

#### b) Callejón de Huaylas

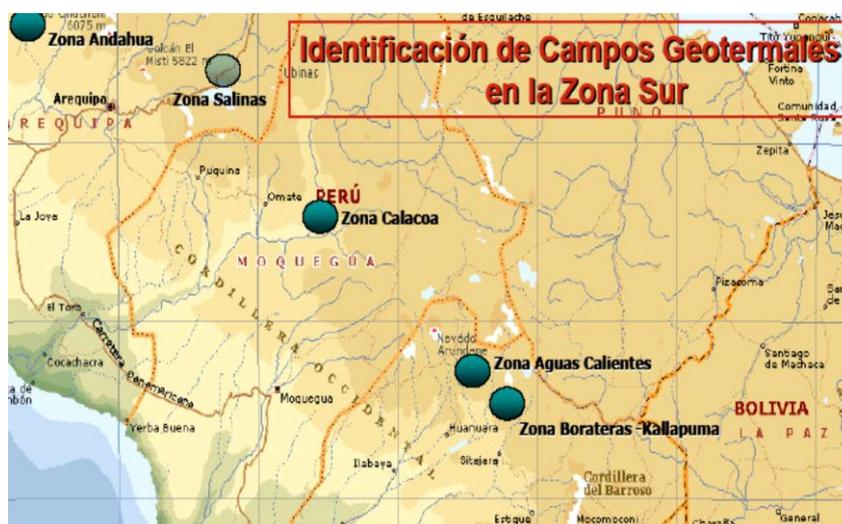
Tipo de aguas: Clorurada sódicas y bicarbonato cálcico.

Geo termometría: SiO<sub>2</sub>: 190°C, Na/K: 200°C, Na/K/Ca; 180°C

En la Macro región sur (Tacna, Moquegua, Arequipa), se han identificado varios campos geotermales (Figura 2.37 y 2.38), siendo los principales los siguientes:

- a) Campo Geotermal Andahua (Arequipa)
- b) Campo Geotermal Salinas (Arequipa)
- c) Campo Geotermal Calacoa (Moquegua)
- d) Campo Geotermal Aguas Calientes Candarave (Tacna)
- e) Campo Geotermal Borateras-Casiri, Chungara (Tacna) (ZAPATA, 2007)

**Figura 8: Identificación de los campos geotermales en la zona sur del Perú.**



Fuente: “Energía Geotérmica en la Región Tacna” (ZAPATA, 2007)

### 2.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA.

La energía geotérmica es la energía calórica contenida en el interior de la tierra, que se transmite por conducción térmica hacia la superficie. Es un recurso parcialmente renovable y de alta disponibilidad, y el conjunto de técnicas utilizadas para la exploración, evaluación y explotación de la energía interna de la tierra se conoce como geotermia.

Existen dos clases de áreas térmicas: las **hidrotérmicos**, que presentan agua a presión alta y temperatura almacenada bajo la corteza de la tierra en una roca permeable cercana a una fuente de calor; y **sistemas de roca caliente**, formados por capas de roca impermeable que recubren una zona calorífica. Con el fin de aprovechar este último sistema, se perfora hasta alcanzarlo, se inyecta agua fría y ésta se utiliza una vez calentada.

Actualmente, los reservorios hidrotérmicos son los más utilizados para fines energéticos, específicamente en la generación de electricidad, y su conformación es determinada por los siguientes factores:

- a) Fuente de calor no muy profunda y próxima al reservorio. Esta fuente de calor puede generarse por la actividad volcánica o por la interacción entre dos placas tectónicas.
- b) Formaciones geológicas permeables que contenga el reservorio.
- c) Estructuras geológicas sobre el yacimiento, que actúen como una capa sello, impermeable, ayudando a la conservación del calor y la presión del reservorio.
- d) Área de recarga hídrica del reservorio, que condiciona la característica de renovable del recurso geotérmico.

En cuanto a la utilización de los reservorios hidrotérmicos, la manera más antigua de aprovechamiento de esta energía ha sido su uso medicinal y turístico. Por otra parte, dependiendo de su entalpía, tiene aplicaciones en: calefacción de viviendas, usos agrícolas, piscicultura y usos industriales.

La geotermia es un recurso que se puede encontrar bajo la forma de volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas geológicamente recientes, esto es, con actividad en los últimos diez o veinte mil años en la corteza terrestre.

Para poder obtener esta energía se requiere de yacimientos de agua caliente cerca de esas áreas. Una descripción básica del proceso de extracción es la siguiente: se perfora el suelo y se extrae el líquido, que sale en forma de vapor si su temperatura es suficientemente alta y se puede utilizar para accionar una turbina que con su rotación mueve un generador que produce energía eléctrica. Posteriormente, mediante un proceso de inyección, el agua geotérmica utilizada se devuelve al pozo para ser recalentada, mantener la presión y sustentar la reserva. (Grez, 2007).

### **2.3.1. Tipos de sistemas geotérmicos**

Los sistemas geotérmicos se encuentran en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas, dando así origen a diferentes tipos de sistemas, estos pueden ser:

#### **2.3.1.1. Sistemas convectivos hidrotermales**

Formados por una fuente de calor, agua (en estado líquido, en forma de vapor, o una mezcla de líquido y vapor) y la roca donde se almacena el fluido,

estos sistemas se encuentran situados a una profundidad relativamente pequeña alrededor de 500m a 10km. La recarga del agua tiene su origen en la superficie de la tierra en forma de lluvia, hielo o nieve, atravesará la corteza terrestre por medio de fracturas y fallas, donde será expuesta a un foco de calor y previamente calentada por medio de la roca, bajo un sellamiento impermeable, garantizando así un elevado flujo térmico de hasta 400°C.

- a) Estos sistemas hidrotermales, que en la actualidad se explotan comercialmente para la generación eléctrica y usos directos, se clasifican de acuerdo con la recarga de agua en:
- b) **Vapor dominante**, Predominancia de vapor seco, son sistemas de alta entalpía que producen vapor sobrecalentado en un grado que varía entre los 0-50°C. Permiten obtener mejor rendimiento en las turbinas generadoras de electricidad. Existen unos cuantos en el mundo, los más conocidos son The Geiseres (Estados Unidos), Matsukawa (Japón) y Larderello (Italia).
- c) **Líquido dominante (alta entalpía)**, Sistemas de alta entalpía con temperaturas entre 150°C y más de 300°C. Tienen correlación con aparatos volcánicos y la tectónica de placas. Son más abundantes que los anteriores, por ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).
- d) **Líquido dominante (baja entalpía)**, Sistemas de baja entalpía con temperaturas menores a los 150°C aproximadamente. Son más abundantes que los de alta entalpía en una proporción de 10 a 1, se encuentran en casi todos los países del mundo, por ejemplo: Heber (Estados Unidos), Yangbajin (China). (LARA, 2011)

A estos dos últimos sistemas también se les conoce como vapor húmedo siendo los más comunes y de mayor aprovechamiento.

### **2.3.1.2. Sistemas geotérmicos mejorados (enhanced geothermal systems)**

Formaciones geológicas de roca que poseen un alto contenido energético, pero debido a las características geológicas propias de estos sistemas (rocas cristalinas y no permeables) carecen de agua, un componente necesario para una forma natural de reservorio geotérmico.

Por lo tanto para producir energía es preciso crear un yacimiento artificial, para esto se perforan dos pozos hasta encontrar la formación rocosa seca, en el primer pozo se bombea agua fría a alta presión ocasionando un fracturamiento hidráulico, de esta manera el agua circulará a través de estas fracturas extrayendo el calor de la roca y adquiriendo condiciones adecuadas de presión y temperatura, en el segundo pozo ubicado a cientos de metros del primero, que intercepta estos fracturamientos se extraerá el agua caliente para su posterior aprovechamiento.

Este sistema también se conoce como Hot Dry Rock o Roca Seca Caliente, situado a una profundidad de 2-4Km con una temperatura de 150 a 300°C, apta para la producción de energía eléctrica encontrándose en un ritmo mayor que los sistemas hidrotermales. Investigación de aplicaciones de esta tecnología se están llevando a cabo en los EE.UU (Fenton Hill y Coso), Francia (Soultz-sous-Forêts y LeMayet), Australia (Cooper Basin) y en otras partes del mundo. Algunos proyectos como centrales de 3 MW o menos están en fase demostrativa. (LARA, 2011)

### **2.3.1.3. Sistemas geotérmicos geopresurizados**

Formaciones sedimentarias permeables intercaladas por estratos impermeables, formadas por agua con sales disueltas y metano, sometidas a grandes presiones, se encuentran situados en áreas con gradiente geotérmico normal a una profundidad de alrededor de 3-6Km. La temperatura oscila entre 90-150°C.

En estos sistemas se puede encontrar energía almacenada en tres formas: energía hidráulica (presión alta), energía química (presencia de metano) y energía térmica (fluido caliente). No se explotan comercialmente en la actualidad, pero son ampliamente investigados y se espera un gran aprovechamiento en el futuro.

### **2.3.1.4. Sistemas marinos**

Sistemas de alta entalpía presentes en el fondo del mar, en la actualidad no se explotan comercialmente y hasta ahora han sido poco estudiados. Un ejemplo de estos sistemas se encuentra en el Golfo de California (México), dentro de los estudios preliminares realizados en ese sitio, mediante inmersiones en un submarino, dieron como resultado la aparición de impresionantes chimeneas naturales descargaban chorros de agua a 350°C, a 2600 metros de profundidad.

### **2.3.1.5. Sistemas magmáticos**

Sistemas constituidos por roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. No son fácilmente accesibles.

Como ejemplos de este sistema se pueden citar, el volcán de Colima (México) y el volcán Mauna Kea (Hawái). Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles ( $\geq 800^{\circ}\text{C}$ ). En la actualidad no se explotan comercialmente. Sin embargo 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. (LARA, 2011)

## **2.4. GENERACIÓN ELÉCTRICA**

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

### **2.4.1. Tipos de centrales de generación geotérmica**

La utilización de recursos geotérmicos como fuente de energía primaria para la generación de electricidad básicamente depende de las características y condiciones naturales del yacimiento geotérmico, de esta forma para determinar los diversos tipos de centrales se toma como referencia tanto presión como temperatura presentes en los mismos. Se puede encontrar 4 prototipos de centrales para generar energía eléctrica en operación comercial, y que se desarrollaran a continuación:

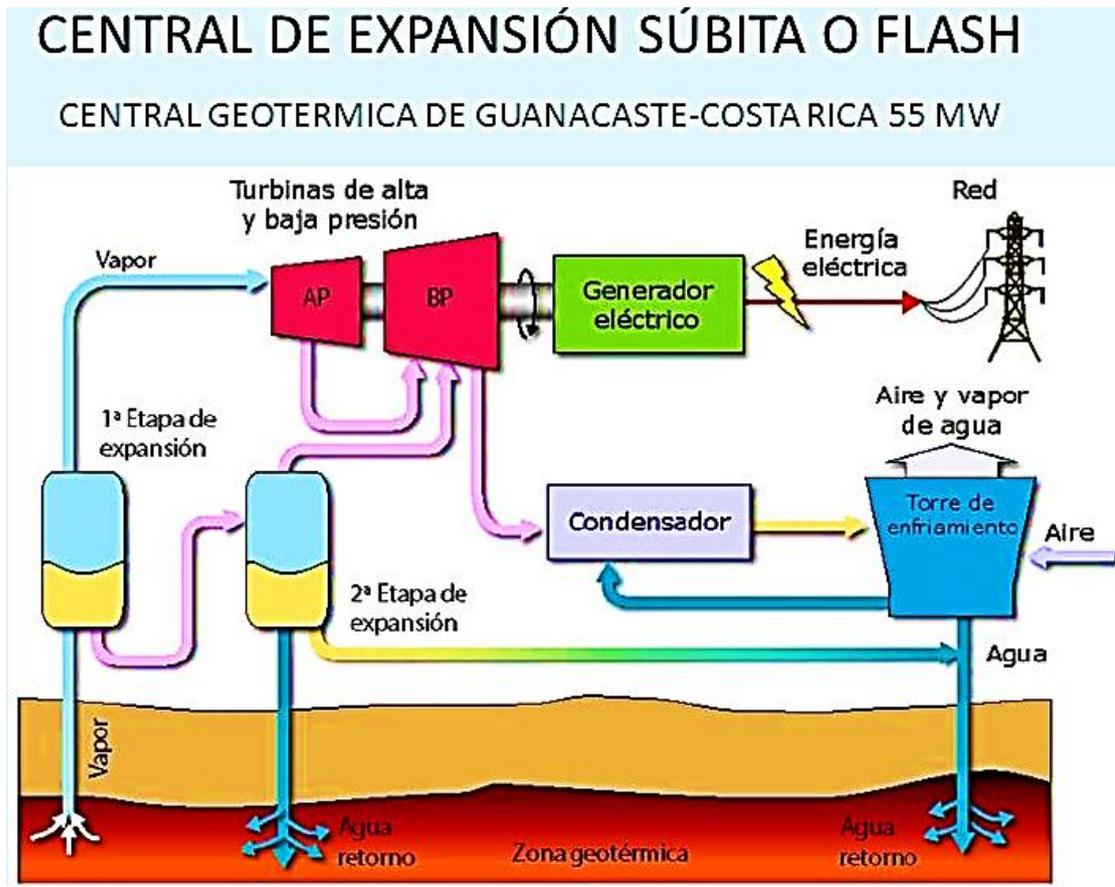
#### 2.4.1.1. Central flash o evaporación súbita

El recurso hidrotérmicos que se utiliza en este tipo de planta está en forma líquida, su temperatura suele variar entre 150-360°C. El agua caliente geotérmica se rocía en un tanque de destello ubicado en la superficie, a presión baja, causando que rápidamente se separe en vapor y agua caliente (salmuera). El vapor se suministra para mover a la turbina y de ésta al generador para la producción de energía. El líquido que permanece en el tanque se inyecta de nuevo en el yacimiento.

En el caso en el que este líquido sea lo suficientemente caliente se rocía nuevamente en un segundo tanque a menor presión que el primero, para evaporarse y dirigirse a una turbina de doble entrada, de esta manera se puede extraer más energía, este sistema que consta de una etapa más se denomina doble flash. Aquí el rendimiento se aumenta en un 20-25% al igual que el costo de la planta en un 5% pero se aprovecha de mejor manera el recurso.

El tamaño en estas plantas depende de las características de vapor, presión y el contenido de gases, los tamaños de turbina típicos están en el rango de 10 MW a 55 MW. Una de las desventajas que presenta este sistema es que el agua contiene sales disueltas y forma una mezcla llamada salmuera, ocasionando problemas de corrosión en las instalaciones geotérmicas. (LARA, 2011).

Figura 9: Diagrama de una central de evaporación súbita o flash.



Fuente: International Geothermal Association.

#### 2.4.1.2. Central de vapor seco

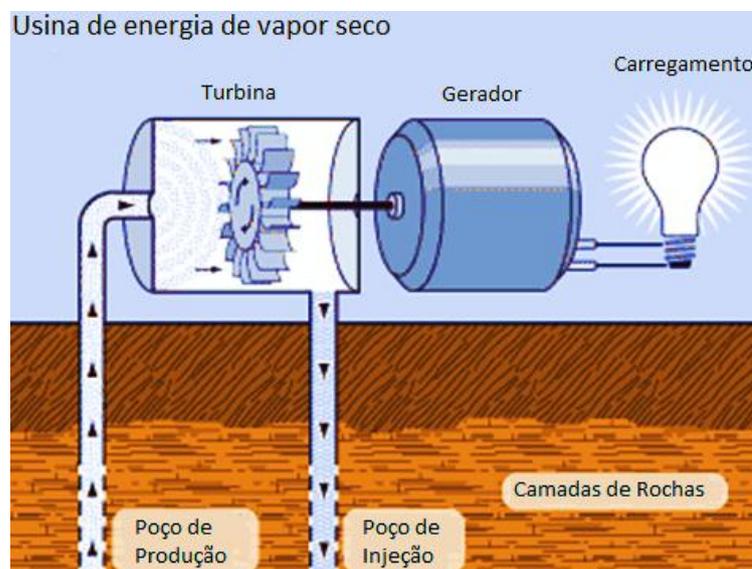
Este tipo de planta se utiliza para producir energía de reservorios de vapor dominante cuya temperatura varía en el rango de 300-350°C. El vapor saturado o ligeramente recalentado, que se produce, es conducido a través de tuberías directamente hacia la turbina-generador para producir así energía eléctrica.

El vapor húmedo se pasa a un condensador para convertirlo en agua, que será reinyectada en el reservorio. En este tipo de planta la separación no es necesaria porque los pozos sólo producen vapor.

Es una tecnología comercialmente disponible, con tamaños de turbina típicos en el rango de 35 MW a 120 MW. Tiene un eficiencia del 30%(baja)

muchas veces afectada por presencia de gases no condensables que reducen la eficiencia en las turbinas. (LARA, 2011).

**Figura 10: Diagrama de una central de vapor seco.**



Fuente: (la GEO)

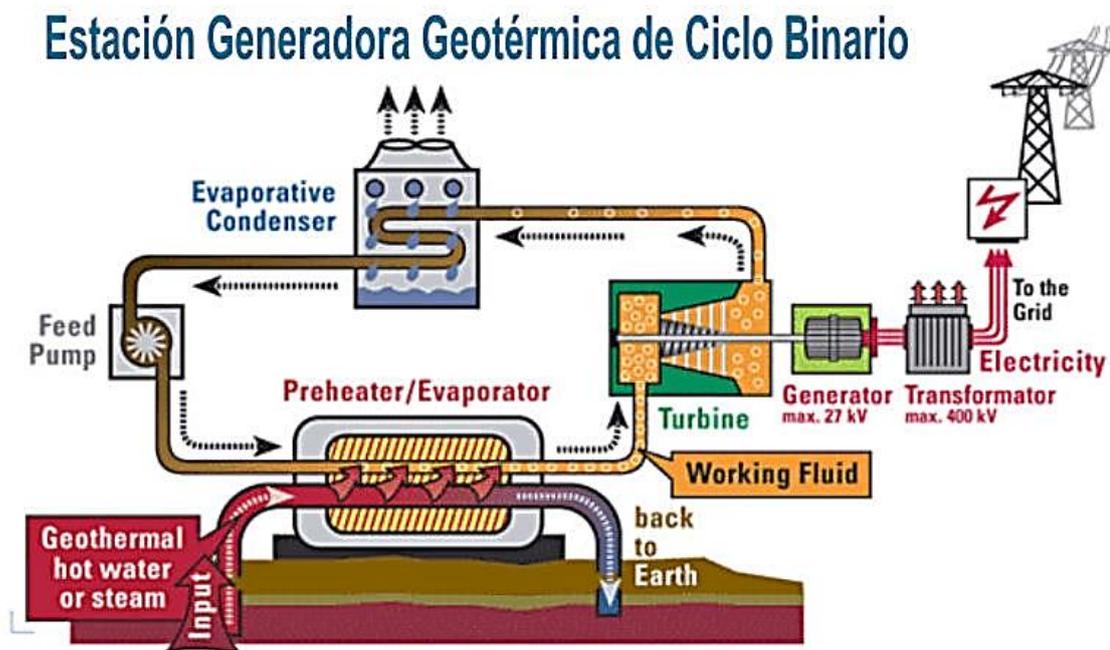
#### 2.4.1.3. Central de ciclo binario

Recientes avances en tecnología geotérmica han hecho posible la producción económica de electricidad a partir de recursos geotérmicos menores a 150°C conocidas como plantas binarias. El agua geotérmica calienta otro líquido (isobutano o propano) que posee un mejor comportamiento termodinámico, es decir bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a bajas temperaturas.

Los dos líquidos se separan totalmente mediante el uso de un intercambiador de calor, donde el agua geotérmica transfiere su calor al fluido de trabajo, al calentarse el fluido secundario se expande en vapor gaseoso, la fuerza de la expansión del vapor hace girar la turbina del generador. El vapor es luego recondensado y convertido en líquido y utilizado repetidamente. En este ciclo cerrado, no hay emisiones al aire.

Estas plantas típicamente varían en el tamaño desde 500 kW a 10 MW, aunque es posible interconectar una serie de unidades adicionales logrando mayor capacidad de generación. El costo de estas plantas estará condicionado por algunos factores pero el más determinante será la temperatura del fluido geotermal utilizado, que además definirá el equipamiento correspondiente, como el tamaño de la turbina, sistema de enfriamiento e intercambiadores de calor. (LARA, 2011).

Figura 11: Diagrama de una central de ciclo binario.



Fuente: ([www.energias.bienescomunes.org/wpcontent/uploads/2012/06/Ciclo-Binario.jpg](http://www.energias.bienescomunes.org/wpcontent/uploads/2012/06/Ciclo-Binario.jpg).)

## 2.5. EL CICLO DE RANKINE

A continuación se considera un ciclo de potencia práctico que se utiliza para generar potencia eléctrica industrial, esto es, un ciclo de potencia que funciona de manera que el fluido de trabajo cambia de fase de líquido a vapor. Es el ciclo

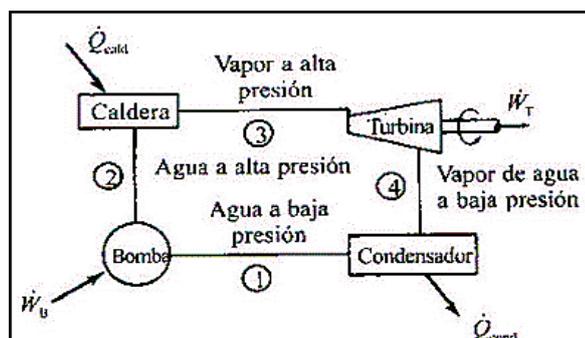
de vapor más simple y se conoce como ciclo Rankine; se muestra de forma esquemática en la figura 12.

La Principal característica del ciclo Rankine es que para comprimir el agua a la presión alta de la caldera, la bomba consume una potencia muy pequeña. Uno de los Posibles inconvenientes es que el proceso de expansión en la turbina por lo general termina en la región bifásica, originándose la formación de pequeñas gotas de líquido que pueden dañar los álabes de la turbina. Este es el ciclo bajo el cual funcionan las plantas de vapor reales. (Garcia, 2012)

El ciclo de Rankine ideal es solo internamente reversible (o cuasi estático) en el que se desprecian las pérdidas en cada uno de los cuatro procesos que lo componen. Las pérdidas generalmente son muy pequeñas y se van a despreciar en los análisis iniciales. El ciclo Rankine se compone de los cuatro procesos ideales mostrados en el diagrama T-s de la figura 13:

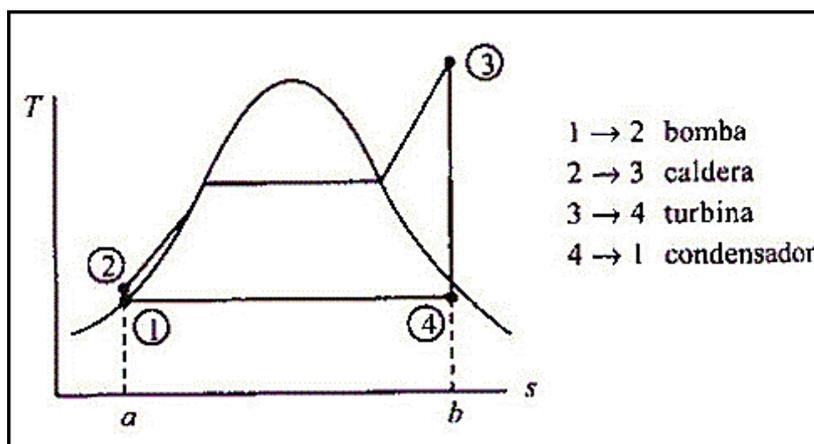
- 1 → 2: Compresión isoentrópica en una bomba
- 2 → 3: Suministro de calor a presión constante en una caldera.
- 3 → 4: Expansión isoentrópica en una turbina
- 3 → 1: Cesión de calor a presión constante en un condensador

**Figura 12: Régimen permanente flujo estable del ciclo de Rankine simple.**



Fuente: (Garcia, 2012)

Figura 13: Diagrama T-s del ciclo idealizado según el esquema.



Fuente: (García, 2012).

### 2.5.1. Funcionamiento del ciclo de Rankine ideal.

El agua entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera. El agua entra a la caldera (o generador de vapor) como líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera es básicamente un gran intercambiador de calor donde el calor que se origina en los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes, se transfiere al agua esencialmente a presión constante. La caldera, con la sección (sobre calentador) donde el vapor se sobrecalienta, recibe el nombre de generador de vapor. El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la turbina donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores del estado 4, donde el vapor entra al condensador. En este estado el vapor es por lo general una mezcla saturada de líquido y vapor con una alta calidad. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor que

rechaza a este hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmosfera. El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo. (Garcia, 2012)

## **2.5.2. Aplicación de las leyes fundamentales.**

### **2.5.2.1. Eficiencia del ciclo Rankine**

Para realizar análisis, basados en la 1<sup>ra</sup> y 2<sup>da</sup> de la termodinámica a los ciclos ideales, se hacen en primer lugar las siguientes simplificaciones en los ciclos reales:

- 1) El ciclo no implica ninguna fricción (caída de presión nula) al fluir en tuberías o dispositivos como los intercambiadores de calor.
- 2) Todas las transformaciones de expansión y compresión ocurren en la forma cuasi-estática.
- 3) Los conductos y tuberías que conectan los diferentes componentes de un sistema están muy bien aislados y la transferencia de calor a través de ellos es insignificante.
- 4) Usualmente se ignoran los cambios en las energías cinéticas y potencial del fluido de trabajo en los equipos, excepto en toberas y difusores.
- 5) El análisis del ciclo se realiza simplificando y combinando las expresiones de 1ra y 2da Ley en cada componente o sistema, como se ve en la figura 4. En la bomba es necesario utilizar también las relaciones Tds.
- 6) Volumen de control: Caldera ( $W=0$ ): (Garcia, 2012)

Calor transferido al fluido por unidad de tiempo:

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}_{cald}(h_3 - h_2) \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}_{cald}(h_3 - h_2) \dots\dots\dots (Ec. 2)$$

Calor transferido al fluido por unidad de masa,  $q=Q/m$ :

$$q_{cald} = h_3 - h_2 \dots\dots\dots (Ec. 3)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{cald} \dots\dots\dots (Ec. 4)$$

Volumen de control: Bomba ( $Q=0$ ):

Potencia consumida por el fluido en la bomba:

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{m}_{bomb}(h_2 - h_1) \dots\dots\dots (Ec. 5)$$

Trabajo por unidad de masa de la bomba,  $w=W/m$ :

$$w_{bomb} = h_2 - h_1 \dots\dots\dots (Ec. 6)$$

De la expresión (3) dado que la bomba es isentrópica ( $s_1=s_2$ ) y el fluido bombeado se aproxima como incompresible ( $v \approx v_1 \approx v_2$ ), el desarrollo de la integral resulta igual al trabajo por unidad de masa de la bomba:

$$w_{bomb} = v(P_2 - P_1) \dots\dots\dots (Ec. 7)$$

$$h_1 = h_{f-P_1} \quad v \cong v_1 = v_{f-P_1} \dots\dots\dots (Ec. 8)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{bomb} \dots \dots \dots (Ec. 9)$$

Volumen de control: Turbina (Q=0):

Potencia producida por el vapor en la turbina:

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{turb} (h_3 - h_4) \dots \dots \dots (Ec. 10)$$

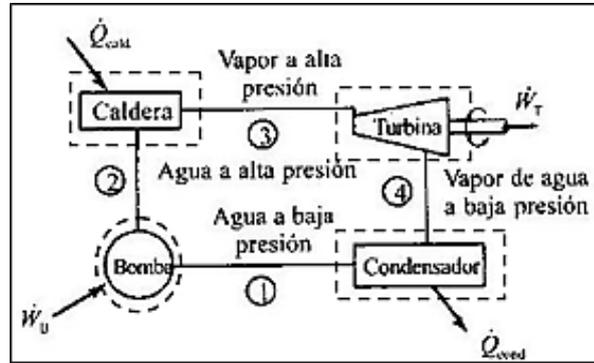
Trabajo por unidad de masa de la turbina:

$$w_{turb} = h_3 - h_4 \dots \dots \dots (Ec. 11)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{turb} \dots \dots \dots (Ec. 12)$$

Figura 14: Esquema del ciclo Rankine de control para el análisis energético.



Fuente: (Garcia, 2012)

Volumen de control: Condensador ( $W=0$ ):

Calor cedido por unidad de tiempo:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{cond}(h_3 - h_2) \dots\dots\dots(\text{Ec. 13})$$

Calor cedido por unidad de masa:

$$q_{cond} = h_4 - h_1 \dots\dots\dots(\text{Ec. 14})$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{cond} \dots\dots\dots(\text{Ec. 15})$$

Volumen de control: Ciclo ideal completo (sin perdidas de calor) ( $Q_{ciclo}=W_{ciclo}$ ,  $m_e=0$ ;  $m_s= 0$ ):

$$\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{bomb} = \dot{Q}_{cald} - \dot{Q}_{cond} = \dot{W}_{neto} \dots\dots\dots(\text{Ec. 16})$$

$$w_{turb} - w_{bomb} = q_{cald} - q_{cond} = w_{neto} \dots\dots\dots(\text{Ec. 17})$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_{bomb} = \dot{m}_{turb} = \dot{m}_{cald} \dots\dots\dots(\text{Ec. 18})$$

Eficiencia del ciclo Rankine:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_{cald}} = \frac{w_{neto}}{q_{cald}} = \frac{w_{turb} - w_{bomb}}{q_{cald}} = 1 - \frac{q_{cond}}{q_{cald}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 19})$$

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 20})$$

Solo para el ciclo ideal, el trabajo neto del mismo viene representado por el área 1-2-3-4-1 en el diagrama T-s de la figura 7; esto encuentra justificación en el hecho de que la primera ley exige que  $w_{ciclo}=q_{ciclo}$ . El calor transferido a la sustancia de trabajo viene representado por el área a-2-3-b-a. Por tanto el rendimiento térmico  $\eta$  del ciclo Rankine viene dado por la(s) ecuación(es) (19).

### 2.5.2.2. Ciclo de Rankine Real

En las secciones anteriores se han explicado solo ciclos ideales, es decir, con la hipótesis de que no existían pérdidas. Estas existen en los ciclos reales y provocan que la eficiencia de estos disminuya. Algunas se enumeran a continuación:

- a) Pérdidas de presión en los conductos de la caldera.
- b) Pérdidas en el vapor sobrecalentado al pasar por los álabes de la turbina.
- c) Subenfriamiento del agua que sale del condensador.
- d) Pérdidas durante el proceso de compresión en la bomba.
- e) Pérdidas en el proceso de combustión.
- f) Irreversibilidades en el subsiguiente proceso de transferencia de calor al fluido que circula por los conductos de la caldera.
- g) Pérdidas de presión del fluido de trabajo al circular por las distintas tuberías.
- h) Pérdidas de calor en las tuberías de alta temperatura.
- i) Vapor que se fuga durante el ciclo.
- j) Aire que ingresa al condensador.

Potencia consumida por equipos auxiliares, como los ventiladores que suministran aire al horno.

Todas estas pérdidas deben considerarse en la evaluación del desempeño de las centrales eléctricas reales. Sin embargo, las pérdidas que realmente son de especial importancia y deben ser contabilizadas en el rendimiento real del ciclo son: las irreversibilidades que suceden dentro de la bomba y la turbina.

### 2.5.2.3. Pérdidas en la turbina

Las pérdidas en la turbina son: 1) transferencia de calor al entorno (sin embargo esta es muy pequeña y generalmente se desprecia) y 2) la principal pérdida es aquella que tiene lugar cuando el vapor de agua se expande en la cascada de alabes de la turbina, debido a la fricción y/o separación de la capa límite. El efecto conseguido en el proceso termodinámico del fluido al pasar por la turbina es tal como se indica en la figura 15, donde:

4<sub>s</sub>: representa el estado después de una expansión isentrópica (entrega de trabajo máxima).

4: representa el estado real a la salida de la turbina.

Para una turbina que opera en forma estable, el estado de entrada del fluido de trabajo y la presión de escape son fijos. La eficiencia isentrópica de una turbina se define como la relación entre la salida de trabajo real de la turbina y la salida de trabajo que se lograría si el proceso entre el estado de entrada y la presión de salida fueran isentrópicos.

Si no se toman en cuenta los cambios de energía cinética y potencial y se desprecia la pérdida por transferencia de calor entonces:

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{h_3 - h_{4s}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 21})$$

Donde

$w_{\text{turb}}$ : es la salida de trabajo real de la turbina por kilogramo de fluido.

$\eta_{\text{turb}}$ : es la eficiencia isentrópica de la turbina.

**2.5.2.4. Pérdidas en la bomba**

Las pérdidas en la bomba son similares a las de la turbina debida principalmente a las irreversibilidades asociadas con el flujo de fluido. La transferencia de calor es casi siempre una perdida menor.

Para una bomba que opera en forma estable, el estado de entrada del fluido de trabajo y la presión de escape son fijos. La eficiencia isentrópica de una bomba se define como la relación entre el trabajo de entrada requerido para elevar la presión de un líquido a un valor especificado de una manera isentrópica y el trabajo de entrada real.

Si no se toman en cuenta los cambios de energía cinética y potencial y se desprecia la pérdida por transferencia de calor entonces, en referencia a la figura 5:

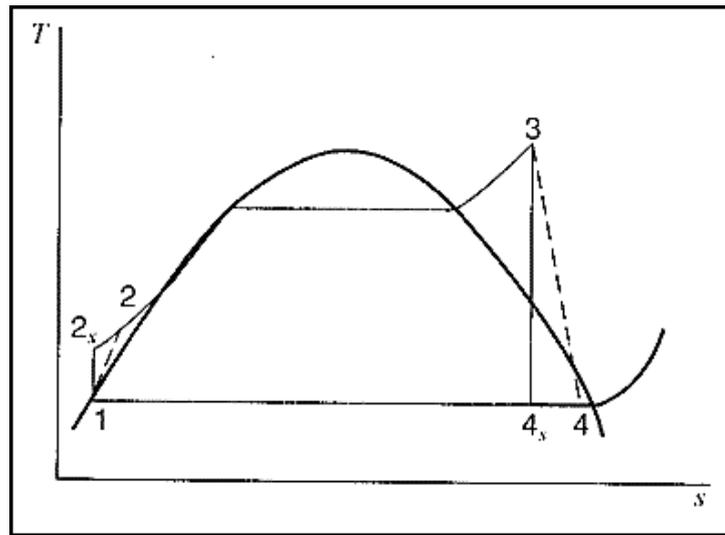
$$\eta_{bomb} = \frac{h_{2s} - h_1}{w_{bomb}} \dots\dots\dots(Ec. 22)$$

Donde:

$w_{bomb}$ : es el trabajo real que se suministra por kilogramo de fluido.

$\eta_{bomb}$ : es la eficiencia isentrópica de la bomba.

$$\rho_a = \alpha * \frac{V}{I} \dots\dots\dots(Ec. 23)$$

**Figura 15: Diagrama temperatura-entropía y el efecto de las ineficiencias.**

Fuente: (Garcia, 2012)

## 2.6. HIPÓTESIS

### 2.6.1. Hipótesis General

La energía geotérmica de las Aguas Termales De Putina – Puno se podrán utilizar para la generación de electricidad para utilizarla en sistemas de pequeña potencia.

### 2.6.2. Hipótesis Específicas

- Si se logra generar energía eléctrica mediante el vapor, será suficiente para sistemas de pequeña potencia.
- Si el vapor generado en las Aguas Termales De Putina – Puno no es el adecuado se podrá utilizar dicho vapor en otra forma de generar energía eléctrica.

## **2.7. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.7.1. TIPO METODOLÓGICO**

El presente estudio corresponde a una investigación de campo, dentro del área de las ciencias físicas y formales en el campo de la protección. Se trata de una investigación del nivel explicativo, exploratoria descriptiva.

El método de investigación en cada objetivo específico es del tipo no experimental, transversal, descriptivo. La toma de datos es del tipo longitudinal, Correlacional, causal, propuesto por Hernández Sampieri en Metodología de la Investigación. (SIAMPERI, 2014)

### **2.7.2. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Aplicaremos la técnica de observación documental a través de documentos estadísticos como instrumentos.

### **2.7.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Para éste trabajo de Investigación se describe las técnicas e instrumentos de recolección de datos en el siguiente detalle:

### **2.7.4. TÉCNICAS**

#### **a) ANÁLISIS DOCUMENTAL**

Mediante el cual se recopilará datos e información necesaria para desarrollar y sustentar éste estudio. Básicamente como su nombre lo indica a través del análisis de documentos existentes.

Se utilizara como fuente los datos, libros, informes, separatas, páginas de internet, etc., referente a temas relacionados con la investigación.

**b) ENCUESTA**

Mediante esta técnica se lograra obtener información directamente desde la muestra. Es un proceso a través del cual conseguiremos datos de información primaria que nos permitan explicar el problema y lograr los objetivos de la investigación mediante preguntas al personal de mantenimiento.

**c) OBSERVACIÓN**

La forma obvia de recopilar datos nuevos es observar el comportamiento, bien sea en un ambiente o escenario de acción donde se logre ver los desgastes de cada accesorio del equipo. La ventaja de observar directamente el comportamiento de la energía geotermica.

**d) INTERNET**

No existe duda sobre las posibilidades que hoy ofrece internet como una técnica de obtener información; es más, hoy se ha convertido en uno de los principales medios para captar información. Por lo tanto se investigó temas relacionados con el comportamiento de la energía geotérmica.

## CAPITULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Tipo de investigación

El método de investigación en cada objetivo específico es del tipo no experimental, transversal, descriptivo. La toma de datos es del tipo longitudinal, Correlacional, causal, propuesto por Hernández Sampieri en Metodología de la Investigación.

En ese sentido el presente proyecto, es una investigación de campo de tipo descriptiva, por ser flexible permite sujetarse a esquemas de razonamiento lógico, es decir permite hacer análisis sistemático del problema, con el propósito de describir, explicar sus causas y efectos, entender su naturaleza y factores constituyentes o predecir su ocurrencia. Los datos de interés son recogidos en forma directa por el propio investigador.

La investigación descriptiva es aquella que se orientan a recolectar informaciones relacionadas con el estado real de las personas, objetos, situaciones o fenómenos, tal cual como se presentaron en su momento de recolección. (Chavez, 2004).

La investigación objeto de estudio se clasificó como descriptiva, debido a que buscó especificar propiedades, características y rangos importantes del fenómeno analizado, en este caso, de la variable estudiada: gestión de mantenimiento. (Sampieri, 1991)

### **3.1.2. Técnicas de recolección de datos**

Son los documentos soporte para registrar la información recolectada. Dependiendo de la técnica empleada se usará uno u otro instrumento. Permiten hacer un mejor análisis de la información con fines estadísticos o para tomar decisiones. (Lizarazo, 2010)

Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. Dentro de cada instrumento pueden distinguirse dos aspectos: La forma: se refiere a las técnicas que utilizamos para la tarea de aproximación a la realidad (observación, entrevista, encuesta, entre otras). El contenido: queda expresado en la especificación de los datos que necesitamos conseguir. Se concreta en una serie de ítems que no son otra cosa que los indicadores que permiten medir a las variables, pero que asumen ahora la forma de preguntas, puntos a observar, elementos para registrar. (Reyes, 2005)

Cuando se ha ideado la encuesta poblacional o instrumento, se ha llegado al nivel de desarrollo del proyecto de investigación donde se deben señalar y precisar de manera clara y desde la perspectiva metodológica, cuales son aquellos métodos, instrumentos y técnicas de recolección de información considerando las particularidades y límite de cada uno de estos, más apropiados, atendiendo a las interrogantes planteadas en la

investigación y a las características del hecho estudiado, que en su conjunto nos permitirá obtener y recopilar los datos que estamos buscando. (Reyes, 2005).

Los instrumentos de investigación y recolección de datos son los medios utilizados por el investigador, para medir el comportamiento o atributos de las variables. (Chavez, 2004)

Para la recolección de información se utilizaran las técnicas:

- a) Observaciones directas.
- b) Mediciones de datos.

Se observó el funcionamiento del comportamiento de los sistemas de energía geotérmica. Otra de las técnicas de recolección de información a utilizar para esta investigación es la aplicación teórica para comprobar la producción de energía eléctrica con energía geotermica.

### **3.1.3. Técnicas de análisis de datos**

Las técnicas que se aplicarán son de dos tipos, las de campo; debido a que se requiere acumular información primaria para después analizar y cuantificarla, y las bibliográficas; para obtener información de documentos y libros referentes al tema. Además se usará información proveniente del Internet para tener conocimiento de los últimos adelantos técnicos en este campo.

Los datos obtenidos en el proceso de investigación son analizados y mostrados en las gráficas, para la mejor visualización, comprensión y así poder elaborar las posibles conclusiones y recomendaciones.

#### **3.1.4. Método de la investigación.**

La metodología utilizada para la investigación de la Evaluación del comportamiento de la energía geotérmica en La Región Puno, consta fundamentalmente de los siguientes pasos:

#### **3.1.5. Unidades de información**

La unidad de observación, es aquella por medio de la cual se obtiene la información; es decir, es la unidad informante. “la unidad de investigación es aquella que contiene elementos que van a ser estudiados”. Para dar respuesta a la unidad de investigación y cumplir con los objetivos. (Parra, 1998)

Se recogen un conjunto de datos según un plan preestablecido que, una vez analizados e interpretados, modificarán o añadirán nuevos conocimientos a los ya existentes, iniciándose entonces un nuevo ciclo de investigación. Los miembros de este equipo de investigación conocen lo que deben hacer durante todo el estudio, aplicando las mismas definiciones y criterios, actuando de forma idéntica ante cualquier duda. Para conseguirlo, es imprescindible escribir un protocolo de investigación donde se especifiquen todos los detalles relacionados con el estudio de la energía geotérmica en La Región Puno.

#### **3.1.6. Temperatura de las aguas termales de Putina**

Para identificar la temperatura de las aguas termales de Putina-Puno, se realiza a través de la toma de datos. Las investigaciones pertinentes se

realizaron desde el mes de abril del año 2016, hasta el mes de marzo del año 2017.

En primer lugar se procedió a hacer un profundo análisis bibliográfico de la energía geotérmica de baja entalpía, todos sus posibles usos y las experiencias a nivel nacional e internacional. Dicha información fue obtenida a partir de fuentes primarias y secundarias, que van desde libros, tesis y publicaciones.

Se midió la temperatura de las aguas termales de Putina-Puno. Para realizar esto se utilizaron termómetros de lectura directa.

La mayoría de las experiencias del proyecto de investigación, y todas las expuestas en esta tesis de grado, se realizaron en el distrito de Putina, Provincia de San Antonio de Putina, Departamento de Puno en las coordenadas: 406880.25 E, 8351329.19 S. Cuadrante 19L. Los resultados de la investigación serán registrados en el cuadro que se refiere a continuación.

**Tabla 3: Registro de datos obtenidos de temperatura.**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.

Elaboración: Propia.

La ubicación se muestra en la figura 16.

**Figura 16: Ubicación geográfica del sitio de experimentación.**



Fuente: (<https://www.google.com.pe/maps/place/San+Antonio+de+Putina>)

### 3.1.7. Potencial Geotérmico de la Región Puno

A fin de poder realizar el objetivo planteado, se procedió con la ubicación de los lugares con presencia de energía geotermal se ubicara en el plano de coordenadas sistema WGS-84 coordenadas UTM, se procederá a registrar en los cuadros que se muestra a continuación.

**Tabla 4: Registro coordenadas.**

Coordenadas		Sistema Cota (msnm)
Norte		
Este		

Elaboración: Propia.

**Tabla 5: Registro de temperaturas de cada fuente.**

REGISTRO DE TEMPERATURA DE CADA FUENTE TERMAL			
Lugar de muestra	Fecha	T °C max.	T °C min

Elaboración: Propia.

Las fuentes termales son las siguientes:

- a) San Antonio de Putina
- b) Puente Bello
- c) Loripongo
- d) Pasanacollo
- e) Ollachea
- f) Acora
- g) Cuyo Cuyo.

### 3.1.8. Cantidad de energía que se puede generar

Para realizar el análisis de la cantidad de energía que se puede generar se tomó como base los recientes avances en tecnología geotérmica han hecho posible la producción económica de electricidad a partir de recursos geotérmicos menores a 150°C conocidas como plantas binarias. El agua geotérmica calienta otro líquido como el isobutano, isopentano, propano u otro similar que posee un mejor comportamiento termodinámico, es decir bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a bajas temperaturas.

Para lo cual se utiliza las propiedades termodinámicas de los elementos mencionados para poder realizar el análisis del comportamiento de estas

sustancias. Se realiza el cálculo teniendo en consideración la siguiente secuencia la que se describe a continuación.

Utilizando el ciclo Rankine simple, utilizando como sustancia de trabajo uno de los elementos que mejor se adapten se procederá de la siguiente manera:

Calculamos la entalpia y entropía a una temperatura inicial y presión inicial: (PINEDO MINES, 2015)

$$h_1 = h(p_1, T_1) \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 24})$$

$$S_1 = S(p_1, T_1) \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K} \dots\dots\dots(\text{Ec. 25})$$

Sabiendo que este proceso es isoentrópico y aplicando la segunda ley de la termodinámica hallamos la entalpía 02 considerando la entropía 02 igual a la entropía 01 y una presión de expansión.

$$h_2 = h(p_2, S_2) \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 26})$$

$$S_2 = S_1 \dots\dots\dots(\text{Ec. 27})$$

Con lo que se determina el valor de la entalpía  $h_2$  que es irreversible. Considerando que la eficiencia de la turbina es:

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{h_3 - h_{4s}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 28})$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_2} \dots\dots\dots(\text{Ec. 29})$$

$$h_{2r} = h_1 - \eta_{\text{TV}}(h_1 - h_2) \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 30})$$

Determinamos la entalpía  $h_3$  de propiedades del fluido, y la densidad por la cual obtendremos el volumen específico.

$$h_3 = h(P_2, \text{ liquido sat.}) \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 31})$$

$$v_3 = v(p_2) \text{ m}^3/\text{Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 32})$$

Determinamos la entalpía  $h_4$  mediante la siguiente ecuación considerando que  $P_4=P_1$  y  $P_3=P_2$ .

$$h_4 = h_3 + v_3(P_4 - P_3) \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 33})$$

Determinamos el estado real de la entalpía  $h_{4r}$  considerando la eficiencia de bomba.

$$\eta_{\text{BOMBA}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4r}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 33})$$

$$h_{4r} = \frac{h_3 - h_4}{\eta_{\text{BOMBA}}} + h_3 \dots\dots\dots(\text{Ec. 34})$$

Procedemos al cálculo en los componentes del ciclo Rankine:

En la turbina el vapor generado en la fuente de calor en el estado 1, con presión y temperatura elevadas, se expande a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el estado 2 a baja presión.

$$\dot{W}_T / \dot{m} = \dot{m}(h_1 - h_{2s}) \dots\dots\dots(\text{Ec. 36})$$

$$\dot{P}_T = \dot{m}(h_1 - h_{2r}) \dots\dots\dots(\text{Ec. 35})$$

Determinamos el h<sub>2</sub> real:

$$\eta_{\text{TURBINA}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 36})$$

$$h_2 = h_1 - \eta_T (h_1 - h_{2r}) \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 37})$$

Donde:

m : Flujo másico del fluido de trabajo

W<sub>T</sub>/m : Trabajo desarrollado en la turbina en KJ/Kg

P<sub>T</sub> : Potencia generada por la turbina en KJ/Kg

En el condensador se inicia en el estado 2, aquí se transfiere calor del vapor al agua en de refrigeración que circula en un flujo separado. El vapor se

condensa y la temperatura del agua de refrigeración aumenta y llega al estado

3.

$$\dot{Q}_c / \dot{m} = (h_2 - h_3) \dots\dots\dots(\text{Ec. 38})$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \dots\dots\dots(\text{Ec. 39})$$

**Donde**

Qc/m : Calor cedido en el condensador en unidades de KJ/Kg.

Q'c : Potencia del condensador e unidades de KJ/Kg

En la bomba el líquido procedente del condensador en el estado 3 es bombeado desde la presión más alta en el estado 4 antes de ingresar a la fuente de calor.

$$\dot{W}_B / \dot{m} = (h_{4S} - h_3) \dots\dots\dots(\text{Ec. 40})$$

$$\dot{P}_B = \dot{m} (h_{4S} - h_3) \dots\dots\dots(\text{Ec. 41})$$

Determinamos el  $h_2$  real.

$$\eta_{BOMBA} = \frac{h_{4S} - h_3}{h_4 - h_3} \dots\dots\dots(Ec. 42)$$

$$h_4 = \frac{h_{4S} - h_3}{\eta_{BOMBA}} + h_3 \dots\dots\dots(Ec. 43)$$

Donde:

$W_B / m$  : Trabajo consumido por la bomba en KJ/Kg.

$P_B$  : Potencia consumida por la bomba en KW

Tenemos un intercambiador de calor que inicia en el estado 4 y termina en el estado 1 dando paso a un nuevo ciclo.

$$\dot{Q}_{InterCalor} / \dot{m} = (h_1 - h_4) \dots\dots(Ec. 44)$$

$$P_{InterCalor} = \dot{m}(h_1 - h_4) \dots\dots(Ec. 45)$$

Donde

$Q_{InterCalor}/m$  : Calor cedido en Intercambiador de calor en KJ/Kg.

$P_{InterCalor}$  : Potencia en el Intercambiador en KJ/Kg.

Calculamos la potencia neta que viene a ser la fracción útil de energía que se desarrolla en el ciclo termodinámico, siendo la diferencia entre la potencia producida por la turbina y la potencia que consume la bomba.

$$P_{neta} = P_{Turbina} - P_{Bomba} \text{ KJ/Kg} \dots\dots\dots(\text{Ec. 46})$$

Donde

$P_{neta}$  : Potencia neta en KJ/Kg.

La potencia neta generada la determinamos con la siguiente ecuación:

$$P_{NetaGenerada} = P_{Neta} \cdot \eta_{Mecanica} \cdot \eta_{Generación} \dots\dots\dots(\text{Ec. 49})$$

**Donde**

$P_{NetaGenerada}$  : Potencia neta generada en KJ/Kg.

$\eta_{Mecánica}$  : Eficiencia de transmisión %.

$\eta_{Generación}$  : Eficiencia de Generación %.

El rendimiento térmico está dado por:

$$\eta_{Planta} = \frac{P_{Generada}}{P_{Sumnistrada}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 47})$$

$$\eta_{Planta} = \frac{P_{Turvina}}{Q_{InterCalor}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 48})$$

$$\eta_{Planta} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} \dots\dots\dots(\text{Ec. 49})$$

Se determinara el flujo másico de este mediante el siguiente balance de energía.

$$\dot{m}_{\text{FluidoGeoterm}} (h_a - h_c) = \dot{m}_{\text{FluidoSecund}} (h_1 - h_4) \dots\dots\dots(\text{Ec. 50})$$

$$\dot{m}_{\text{FluidoGeoterm}} C_{p_{\text{FluidoGeoterm}}} (T_a - T_c) = \dot{m}_{\text{FluidoSecund}} (T_1 - T_4) \dots\dots\dots(\text{Ec. 51})$$

Donde:

- $C_p$  : Calor específico del fluido geotérmico y secundario KJ/Kg °C  
 $T_1$  : Temperatura inicial del fluido secundario en el ciclo cerrado, en°C  
 $T_4$  : Temperatura final del fluido secundario en el ciclo cerrado en °C.  
 $T_a$  : Temperatura de entrada del fluido geotermal al intercambiador °C.  
 $T_c$  : Temperatura de salida del fluido geotermal del intercambiador °C.

(PINEDO MINES, 2015)

### 3.1.9. Implicancias y obstáculos del proyecto

Para evaluar las implicancias y obstáculos que tendría el presente proyecto se recurre a la información obtenida mediante la experiencia en la implementación de otros proyectos similares u otras investigaciones realizadas.

### 3.1.10. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Con el fin de lograr los objetivos planteados se llegan a elegir las siguientes técnicas e instrumentos:

**Tabla 6: Técnicas e Instrumentos**

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Medición - Permite identificar y evaluar datos reales	a- Medida de la Temperatura, de las fuentes termales.

Elaboración: Propia.

### 3.1.11. Recolección de Información Para la Investigación

La información necesaria para el trabajo de Investigación se recopiló en bibliotecas especializadas, Internet, consulta a ingenieros especialistas (Mecánicos-Electricistas, Mecánicos) instituciones, principalmente de la Universidad Nacional del Altiplano de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica del área de mecánica, universidades y centros de investigación a nivel nacional e internacional que puedan contribuir al desarrollo óptimo del proyecto de Tesis.

### 3.1.12. Procesamiento de Datos

Teniendo en cuenta que se tendrán varios parámetros de diseño, su procesamiento implicará un análisis multivariado, que nos permitirá analizar las relaciones entre variables independientes y dependientes.

### 3.1.13. Variables

#### **Independientes:**

Evaluación de la temperatura de la fuente geotermal.

#### **Dependientes:**

Potencia de generación eléctrica.

## CAPITULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se interpreta y analizan los datos obtenidos a partir de fuentes de información que se mencionaron en el capítulo anterior, de tal forma de extraer significados relevantes con relación al problema de investigación y dar respuestas a los objetivos planteados, en relación a las dimensiones en las cuales se descompone la variable operacional Generación de energía a través de la fuente termal de Putina y la evaluación de las fuentes geotermales importantes del departamento de Puno.

#### 4.1 TEMPERATURA DE LAS AGUAS TERMALES DE PUTINA

El resultado del diagnóstico y la evaluación de la temperatura de las aguas de Putina nos dieron que tiene una temperatura mínima de 61.7°C, una temperatura máxima de 65.4°C. Estas mediciones fueron realizadas en el mes de junio del 2016, considerando que es un mes frío.

La ubicación en coordenadas UTM, se presenta en el cuadro a continuación.

**Tabla 7: Ubicación de la fuente geotermal de Putina**

Coordenadas		Sistema Cota (msnm)
Norte	8351329.19	3875
Este	406880.25	

Elaboración: Propia.

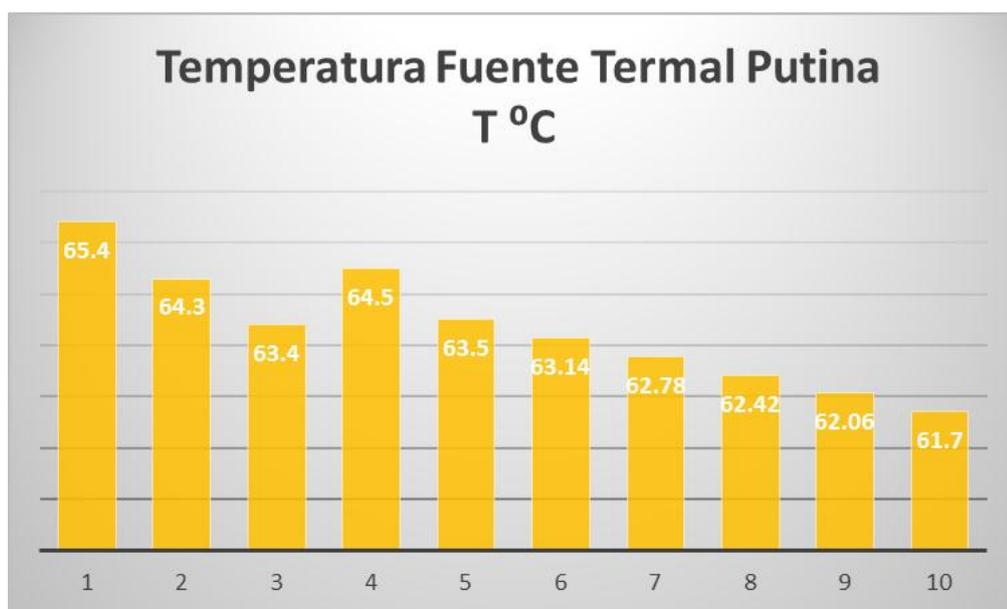
Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 8: Valores de temperatura Fuente Termal Putina**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Putina	domingo, 19 de junio de 2016	65.4	65.4	61.7	63.32
	domingo, 19 de junio de 2016	64.3			
	domingo, 19 de junio de 2016	63.4			
	domingo, 19 de junio de 2016	64.5			
	domingo, 19 de junio de 2016	63.5			
	domingo, 19 de junio de 2016	63.14			
	domingo, 19 de junio de 2016	62.78			
	domingo, 19 de junio de 2016	62.42			
	domingo, 19 de junio de 2016	62.06			
	domingo, 19 de junio de 2016	61.7			

Elaboración: Propia.

Figura 17: Diagrama de Pareto valores de temperatura Putina.



Elaboración: Propia.

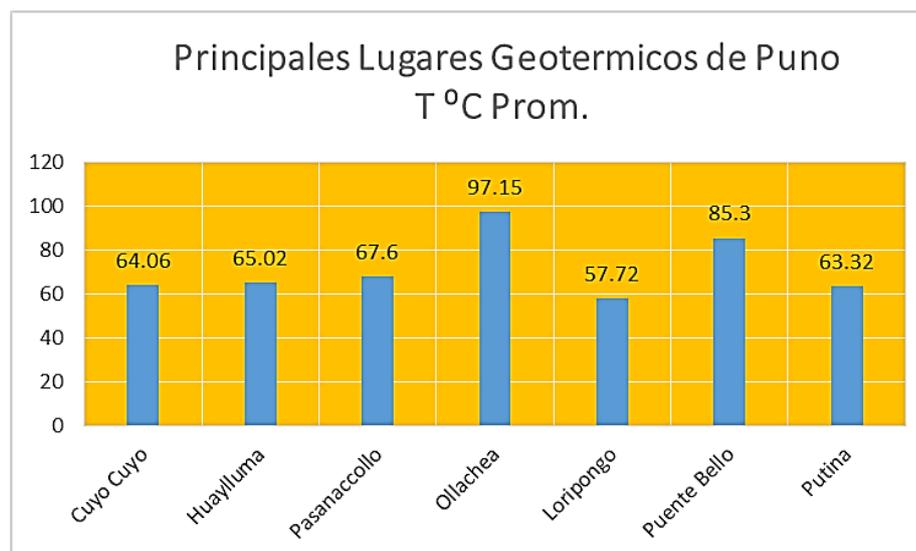
#### 4.2 POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA REGIÓN PUNO

Se realizó el estudio y la identificación del potencial geotérmico de la Región de Puno, localizando las principales fuentes geotermales según lo planteado en el objetivo y la metodología del presente trabajo de investigación; las principales fuentes geotermales identificadas se muestran en el cuadro que se presenta a continuación:

Tabla 9: Principales lugares geotérmicos de la Región Puno.

Item	Lugar de muestra	T °C Prom.
1	Cuyo Cuyo	64.06
2	Huaylluma	65.02
3	Pasanacollo	67.6
4	Ollachea	97.15
5	Loripongo	57.72
6	Puente Bello	85.3
7	Putina	63.32

Elaboración: Propia.

**Figura 18: Temperatura Promedio de las fuentes termales de Puno.**

Elaboración: Propia.

Se ha identificado siete principales fuentes geotermales en la Región de Puno, en donde el que resalta por su temperatura es la fuente geotermal de Ollachea con una temperatura promedio de 97.5 °C y la fuente geotermal de Loripongo presento un promedio de 57.72°C siendo esta la que presenta el menor potencia geotérmico de las fuentes analizadas en la presente investigación. Los resultados obtenidos se muestran a continuación de acuerdo a cada fuente geotérmica analizada.

**Fuente Geotermal de Cuyo Cuyo.-** Se encuentra a una distancia de 3.0 Km al Sur de Cuyo Cuyo en la Provincia de Sandía, Región de Puno.

La fuente termal registra una temperatura mínima de 54.7°C, una temperatura máxima de 73.8°C. Estas mediciones fueron realizadas a finales del mes de Mayo del 2016, considerando que es un mes frio. Se ha evidenciado varios brotes de aguas termales.

**Tabla 10: Valores de temperatura Fuente Termal Cuyo Cuyo.**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Cuyo Cuyo	sábado, 28 de mayo de 2016	69.9	73.8	54.7	64.1
	sábado, 28 de mayo de 2016	57.9			
	sábado, 28 de mayo de 2016	57.6			
	sábado, 28 de mayo de 2016	68.1			
	sábado, 28 de mayo de 2016	65.1			
	sábado, 28 de mayo de 2016	73.8			
	sábado, 28 de mayo de 2016	73.2			
	sábado, 28 de mayo de 2016	55			
	sábado, 28 de mayo de 2016	54.7			
	sábado, 28 de mayo de 2016	65.3			

Elaboración: Propia.

**Tabla 11: Ubicación Fuente Termal Cuyo Cuyo.**

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8398257	3400
Este	440724	

Elaboración: Propia.

**Fuente Geotermal de Huaylluma.-** Se encuentra en la comunidad campesina de Huaylluma, Distrito Macusani, Provincia de Carabaya, Región de Puno.

La fuente termal registra una temperatura mínima de 64.1°C, una temperatura máxima de 66.0°C. Estas mediciones fueron realizadas a finales del mes de Mayo del 2016, considerando que es un mes frío. Se ha evidenciado varios brotes de aguas termales.

Tabla 12: Valores de temperatura Fuente Termal Huaylluma.

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Huaylluma	domingo, 29 de mayo de 2016	65.8	66	64.1	65.0
	domingo, 29 de mayo de 2016	65.2			
	domingo, 29 de mayo de 2016	65.2			
	domingo, 29 de mayo de 2016	64.8			
	domingo, 29 de mayo de 2016	65.1			
	domingo, 29 de mayo de 2016	66			
	domingo, 29 de mayo de 2016	64.9			
	domingo, 29 de mayo de 2016	64.5			
	domingo, 29 de mayo de 2016	64.6			
	domingo, 29 de mayo de 2016	64.1			

Elaboración: Propia.

Tabla 13: Ubicación Fuente Termal Huaylluma.

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8441620	3670
Este	325002	

Elaboración: Propia.

**Fuente Geotermal de Pasanacollo.-** Se encuentra en la comunidad campesina de Pasanacollo, en el Distrito de Nuñoa, Provincia de Melgar Región de Puno.

La fuente termal registra una temperatura mínima de 65.1°C, una temperatura máxima de 70.3°C. Estas mediciones fueron realizadas a finales del mes de Junio del 2016, considerando que es un mes frío.

**Tabla 14: Valores de temperatura Fuente Termal Pasanacollo.**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom
Pasanacollo	sábado, 04 de junio de 2016	66.5	70.3	65.1	67.6
	sábado, 04 de junio de 2016	65.1			
	sábado, 04 de junio de 2016	67.9			
	sábado, 04 de junio de 2016	67.3			
	sábado, 04 de junio de 2016	67.9			
	sábado, 04 de junio de 2016	67.3			
	sábado, 04 de junio de 2016	68.2			
	sábado, 04 de junio de 2016	67.7			
	sábado, 04 de junio de 2016	67.8			
	sábado, 04 de junio de 2016	70.3			

Elaboración: Propia.

**Tabla 15: Ubicación Fuente Termal Pasanacollo.**

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8388670	3940
Este	336463	

Elaboración: Propia.

**Fuente Geotermal de Ollachea.-** Se encuentra en el Distrito de Ollachea, Provincia de Carabaya, Departamento de Puno.

La fuente termal registra una temperatura mínima de 93.6°C, una temperatura máxima de 99.9°C. Estas mediciones fueron realizadas en el mes de Junio del 2016, considerando que es un mes frio.

Tabla 16: Valores de temperatura Fuente Termal Ollachea.

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom
Ollachea	domingo, 05 de junio de 2016	93.8	99.9	93.6	97.2
	domingo, 05 de junio de 2016	93.6			
	domingo, 05 de junio de 2016	94.9			
	domingo, 05 de junio de 2016	94.8			
	domingo, 05 de junio de 2016	98.8			
	domingo, 05 de junio de 2016	97.6			
	domingo, 05 de junio de 2016	99.9			
	domingo, 05 de junio de 2016	99.8			
	domingo, 05 de junio de 2016	99.1			
	domingo, 05 de junio de 2016	99.2			

Elaboración: Propia.

Tabla 17: Ubicación Fuente Termal Ollachea.

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8473750	2720
Este	340536	

Elaboración: Propia.

**Fuente Geotermal de Loripongo.-** Se encuentra a un margen de la carretera interoceánica a Moquegua, en el sector de Loripongo, Distrito de Pichacani, Provincia y Departamento de Puno.

La fuente termal registra una temperatura mínima de 53.9°C, una temperatura máxima de 60.1°C. Estas mediciones fueron realizadas en el mes de Junio del 2016, considerando que es un mes frío.

Tabla 18: Valores de temperatura Fuente Termal Loripongo.

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Loripongo	sábado, 11 de junio de 2016	60.1	60.1	53.9	57.7
	sábado, 11 de junio de 2016	59.8			
	sábado, 11 de junio de 2016	56.4			
	sábado, 11 de junio de 2016	56			
	sábado, 11 de junio de 2016	58.9			
	sábado, 11 de junio de 2016	58.2			
	sábado, 11 de junio de 2016	54.2			
	sábado, 11 de junio de 2016	53.9			
	sábado, 11 de junio de 2016	60			
	sábado, 11 de junio de 2016	59.7			

Elaboración: Propia.

Tabla 19: Ubicación Fuente Termal Loripongo.

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8201119	4092
Este	377951	

Elaboración: Propia.

**Fuente Geotermal de Puente Bello.-** Se ubica a un margen de la carretera interoceánica a Moquegua, distrito de Pichacani, provincia y Región de Puno.

La fuente termal registra una temperatura mínima de 81.5°C, una temperatura máxima de 87.8°C. Estas mediciones fueron realizadas en el mes de Junio del 2016, considerando que es un mes frío.

**Tabla 20: Valores de temperatura Fuente Termal Puente Bello.**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Puente Bello	domingo, 12 de junio de 2016	87.5	87.8	81.5	85.3
	domingo, 12 de junio de 2016	87.1			
	domingo, 12 de junio de 2016	87.8			
	domingo, 12 de junio de 2016	87.1			
	domingo, 12 de junio de 2016	86.1			
	domingo, 12 de junio de 2016	85.7			
	domingo, 12 de junio de 2016	84.3			
	domingo, 12 de junio de 2016	83.8			
	domingo, 12 de junio de 2016	82.1			
	domingo, 12 de junio de 2016	81.5			

Elaboración: Propia.

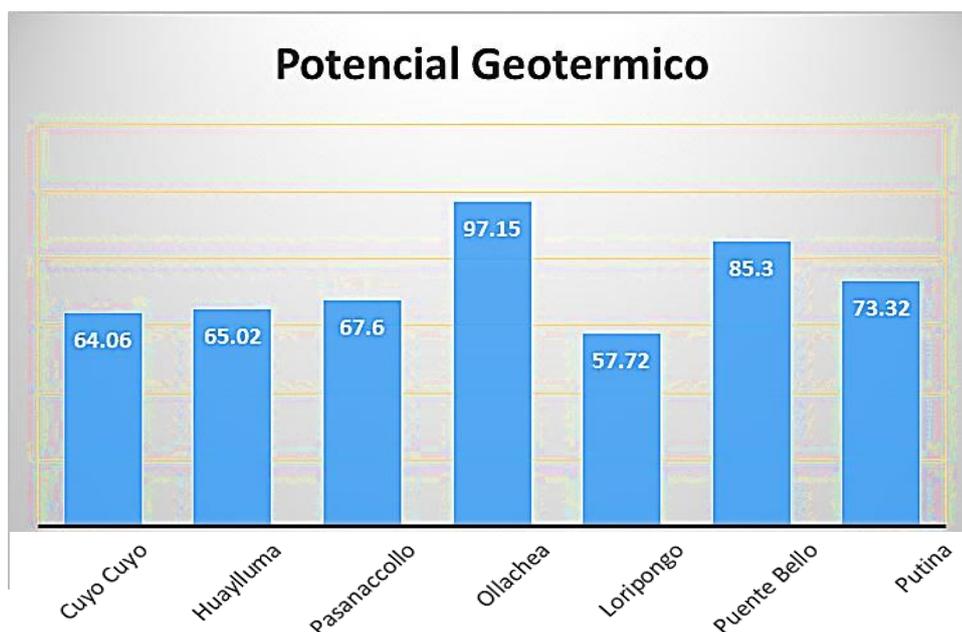
**Tabla 21: Ubicación Fuente Termal Puente Bello.**

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8169984	4200
Este	352635	

Elaboración: Propia.

Se ha identificado siete principales fuentes geotermales en la Región de Puno, en donde el que resalta por su temperatura es la fuente geotermal de Ollachea con una temperatura promedio de 97.5 °C y la fuente geotermal de Loripongo presento un promedio de 57.72°C siendo esta la que presenta el menor potencia geotérmico de las fuentes analizadas en la presente investigación. Los resultados obtenidos se muestran a continuación de acuerdo a cada fuente geotérmica analizada.

**Figura 19: Temperatura Promedio de las principales fuentes termales de Puno.**



Elaboración: Propia.

### 4.3 CANTIDAD DE ENERGIA QUE SE PUEDE GENERAR

Para realizar el análisis de la cantidad de energía que se puede generar se procede a realizar el cálculo de acuerdo a lo planteado en el capítulo anterior.

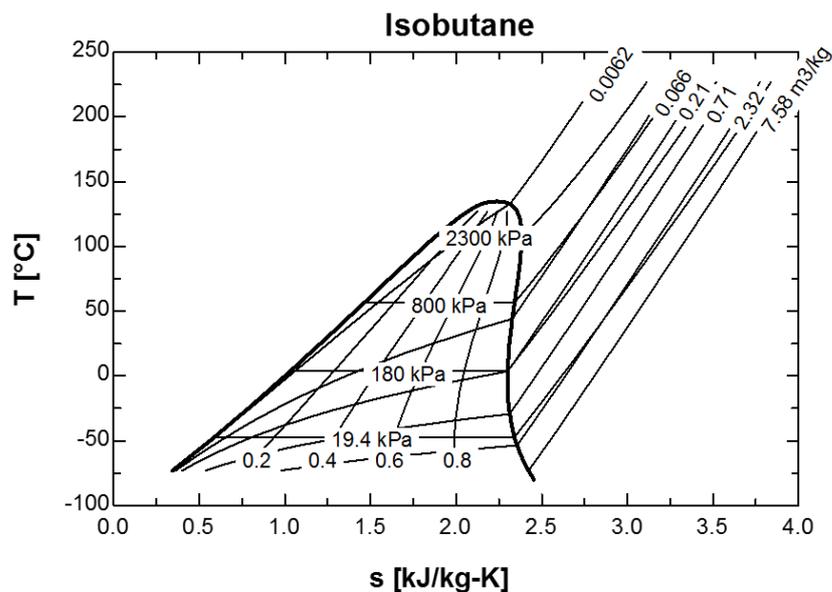
Para lo cual se utiliza las propiedades termodinámicas de los elementos mencionados para poder realizar el análisis del comportamiento de estas sustancias. Utilizando el ciclo Rankine simple, utilizando como sustancia de trabajo el Isobutano se tiene lo siguiente:

Calculamos la entalpia y entropía a una temperatura inicial de 62°C y presión inicial 10 bares, utilizando el isobutano como sustancia secundaria se tiene los resultados usando las ecuaciones (24) y (25):

$$h_1 = h(p_1, T_1) = 663.4 \text{ KJ/Kg}$$

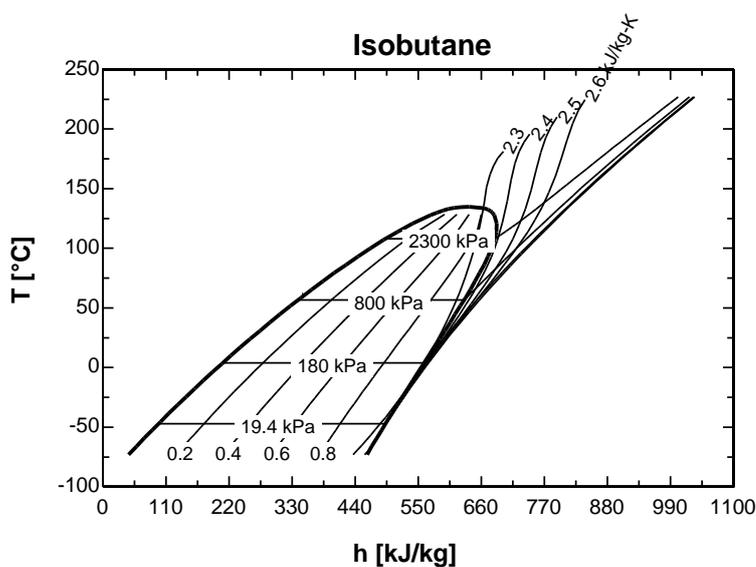
$$S_1 = S(p_1, T_1) = 3.046 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{K}$$

Figura 20: Diagrama T-S.



Elaboración: Propia.

Figura 21: T-H del isobutano.



Elaboración: Propia.

Tabla 22: Propiedades del Isobutano a diferentes Temperaturas.

TEMPERATURA (°C)	PRESION ABSOLUTA bar	DENSIDAD LIQUIDO Kgr/m3	DENSIDAD VAPOR kgr/m3	ENTALPIA LIQUIDO Kj/Kg	ENTALPIA VAPOR kj/kg
-20	0.7195	602.8	2.055	-18.69	355.6
-10	1.079	591.9	2.998	3.627	368.8
-1	1.509	581.7	4.103	24.15	380.8
0	1.564	580.6	4.243	26.46	382.2
10	2.201	568.9	5.853	49.85	395.6
20	3.018	556.9	7.897	73.83	409.1
30	4.043	544.3	10.46	98.44	422.5
40	5.308	531.2	13.63	123.7	435.8
50	6.843	517.4	17.55	149.8	448.9
<b>60</b>	<b>8.683</b>	<b>502.7</b>	<b>22.36</b>	<b>176.6</b>	<b>461.8</b>
65	9.728	494.9	25.17	190.4	468
66	9.947	493.4	25.76	193.1	469.3
67	10.17	491.8	26.38	195.9	470.5
68	10.4	490.2	27	198.7	471.7
69	10.63	488.5	27.63	201.5	473

Elaboración: Propia.

Sabiendo que este proceso es isoentrópico y aplicando la segunda ley de la termodinámica hallamos la entalpía 2 considerando la entropía 2 igual a la entropía 1 y una presión de expansión. Los resultados usando las ecuaciones (26) y (27):

$$h_{2s} = h(p_2, S_2) = 547 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_2 = S_1 = 3.046 \text{ Kj/Kg} - \text{K}$$

Con lo que se determina el valor de la entalpía  $h_2$  que es irreversible. Considerando que la eficiencia de la turbina. Los resultados usando las ecuaciones (28), (29) y (30) es:

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{h_3 - h_{4r}}$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_2}$$

$$h_{2r} = h_1 - \eta_{\text{TV}}(h_1 - h_2) = 560.968 \text{ KJ/Kg}$$

Determinamos la entalpía  $h_3$  de propiedades del fluido, y la densidad por la cual obtendremos el volumen específico. Los resultados usando las ecuaciones (31) y (32).

$$h_3 = h(P_2, \text{liquido sat.}) = 3.851 \text{ KJ/Kg}$$

$$v_3 = v(p_2) = 0.001473 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

Determinamos la entalpía  $h_4$  mediante la siguiente ecuación considerando que  $P_4=P_1=10 \text{ bar}$  y  $P_3=P_2=0.65 \text{ bar}$ , el resultado usando la ecuación (32).

$$h_4 = h_3 + v_3(P_4 - P_3) \times 100 = 5.229 \text{ KJ/Kg}$$

Determinamos el estado real de la entalpía  $h_{4r}$  considerando la eficiencia de bomba igual a 0.8. Los resultados usando las ecuaciones (33) y (34).

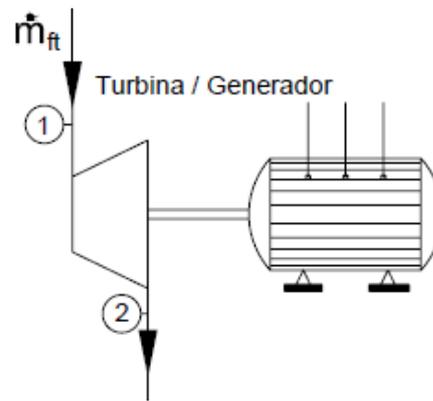
$$\eta_{\text{BOMBA}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4r}}$$

$$h_{4r} = \frac{h_3 - h_4}{\eta_{\text{BOMBA}}} + h_3 = 2.129 \text{ KJ/Kg}$$

Procedemos al cálculo en los componentes del ciclo Rankine:

En la turbina el vapor generado en la fuente de calor en el estado 1, con presión y temperatura elevadas, se expande a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el estado 2 a baja presión.

**Figura 22: Turbina y generador del ciclo binario.**



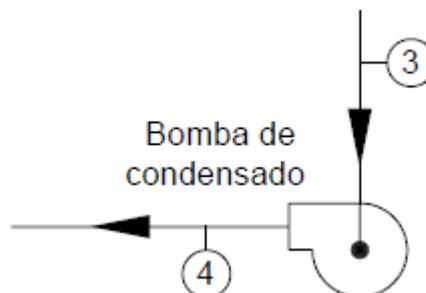
Fuente: (Garcia, 2012)

Los resultados usando las ecuaciones (36).

$$\dot{W}_T = (h_1 - h_{2r}) = (663.4 - 560.9) = 102.4 \text{Kj} / \text{Kg}$$

Determinamos la Potencia de la bomba usando el caudal del fluido secundario 1Kg/s y los datos obtenidos.

**Figura 23: Bomba de condensado del ciclo binario.**



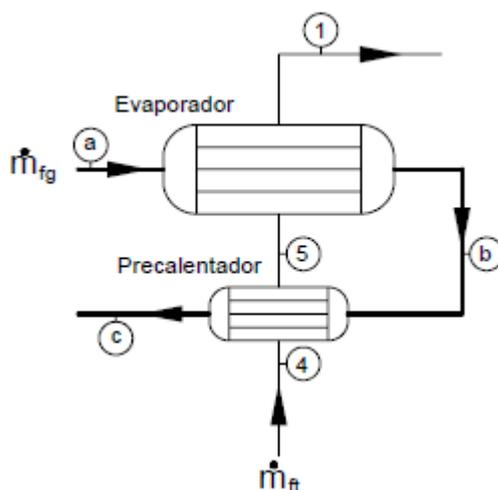
Fuente: (Garcia, 2012)

Los resultados usando las ecuaciones (40).

$$\dot{W}_B = (h_{4r} - h_3) = 1.72 \text{Kj} / \text{Kg}$$

Determinamos el flujo másico del gas secundario según balance de energía con con el gas Isobutano de entrada y salida del Fluido Geotermal y Secundario al intercambiador de Calor.

**Figura 24: Pre calentador y evaporador del ciclo binario.**



Fuente: (Garcia, 2012)

Los resultados usando las ecuaciones (50) y (51).

$$\dot{m}_{fg} Cp_{fg} (T_a - T_b) = \dot{m}_{fg} Cp_{fs} (T_1 - T_4)$$

$$\dot{m}_{fg} = \frac{\dot{m}_{fg} Cp_{fg} (T_a - T_b)}{Cp_{fs} (T_1 - T_4)} = 0.5014 \text{Kg/s}$$

Determinamos la Potencia de la turbina. Los resultados usando las ecuaciones (35).

$$P_{Turbina} = \dot{m}_{fs} (h_1 - h_{2r}) = 51.13 \text{Kj/s}$$

$$P_{Turbina} = 51.13 \text{KW}$$

La potencia en la bomba. El resultado usando la ecuación (41).

$$\dot{P}_B = \dot{m}_{\text{sec}} (h_{4r} - h_3) = 0.69 \text{ KJ/s} = 0.69 \text{ KW}$$

Calculamos la potencia neta que viene a ser la fracción útil de energía que se desarrolla en el ciclo termodinámico, siendo la diferencia entre la potencia producida por la turbina y la potencia que consume la bomba. El resultado usando la ecuación (46).

$$P_{\text{neta}} = P_{\text{Turbina}} - P_{\text{Bomba}} = 50.66 \text{ KJ/s} = 50.66 \text{ KW}$$

La potencia neta generada la determinamos con la siguiente ecuación (49):

$$P_{\text{NetaGenerada}} = P_{\text{Neta}} \cdot \eta_{\text{Mecanica}} \cdot \eta_{\text{Generación}} = 42.31 \text{ KJ/s} = 42.31 \text{ KW}$$

El rendimiento térmico está dado por:

Los resultados usando las ecuaciones (50), (51) y (52).

$$\eta_{\text{Planta}} = \frac{P_{\text{Generada}}}{P_{\text{Suministrada}}}$$

$$\eta_{\text{Planta}} = \frac{P_{\text{Turbina}}}{Q_{\text{InterCalor}}}$$

$$\eta_{\text{Planta}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} = 0.1556 = 15.56\%$$

#### 4.4 IMPLICANCIAS Y OBSTÁCULOS DEL PROYECTO

De acuerdo a la información proporcionada por el Ministerio de Energía y Minas podemos establecer las siguientes implicancias u obstáculos:

- a) Los costos de inversión en la etapa inicial son altos y la asignación de recursos para la exploración implica un riesgo significativo
- b) Falta de profesionales especialistas en materia de exploración y explotación de recursos geotérmicos
- c) La ubicación de los campos geotérmicos en parques nacionales o áreas protegidas impide su desarrollo, a ello se suma la consulta previa a los pueblos indígenas.
- d) Los instrumentos ambientales que deben aplicarse no están definidos
- e) La tarifa de generación de energía eléctrica es alta en comparación con otras fuentes como la generación hidroeléctrica
- f) Legalmente sólo se ha incidido en la utilización de la energía geotérmica con fines de generación eléctrica sin considerar su uso multipropósito (calefacción urbana, invernaderos, etc.).
- g) La energía geotérmica no es prioritaria en la matriz energética del país, dado que se cuenta con otros recursos, como la hidroelectricidad.
- h) La principal barrera del desarrollo de la energía geotérmica es el alto riesgo y una significativa inversión inicial en la fase de perforación, lo cual se traduce en tarifas altas con relación a los otros recursos renovables
- i) Una política importante del gobierno sería apoyar el desarrollo de la geotermia en su fase inicial.

## CONCLUSIONES

**PRIMERO:** El resultado del diagnóstico y la evaluación de la temperatura de las aguas de Putina nos dieron que tiene una temperatura mínima de  $61.7^{\circ}\text{C}$ , una temperatura máxima de  $65.4^{\circ}\text{C}$ . Estas mediciones fueron realizadas en el mes de junio del 2016, considerando que es un mes frío.

**SEGUNDO:** Se ha identificado siete principales fuentes geotermales en la Región de Puno, en donde el que resalta por su temperatura es la fuente geotermal de Ollachea con una temperatura promedio de  $97.5^{\circ}\text{C}$  y la fuente geotermal de Loripongo presento un promedio de  $57.72^{\circ}\text{C}$  siendo esta la que presenta el menor potencial geotérmico de las fuentes analizadas en la presente investigación. Los resultados obtenidos se muestran a continuación de acuerdo a cada fuente geotérmica analizada.

**TERCERO:** Para realizar el análisis de la cantidad de energía que se puede generar se procedido a realizar el cálculo de acuerdo a lo planteado en el capítulo III de la presente investigación para lo cual se utiliza las propiedades termodinámicas del Isobutano utilizado como sustancia de trabajo. Utilizando el ciclo Rankine simple y con el software EES versión 6.883 se realizó el análisis correspondiente teniendo como resultado que se puede generar  $42.31\text{ KW}$  implementando una planta con un ciclo binario con una eficiencia de  $15.56\%$ .

**CUARTO:** En cuanto a las implicancias u obstáculos podemos tener los más importantes: los costos de inversión en la etapa inicial son altos y la asignación de recursos para la exploración implica un riesgo significativo, falta de profesionales especialistas en materia de exploración y explotación de recursos

geotérmicos, la tarifa de generación de energía eléctrica es alta en comparación con otras fuentes como la generación hidroeléctrica, la energía geotérmica no es prioritaria en la matriz energética del país, dado que se cuenta con otros recursos, como la hidroelectricidad, la principal barrera del desarrollo de la energía geotérmica es el alto riesgo y una significativa inversión inicial en la fase de perforación, lo cual se traduce en tarifas altas con relación a los otros recursos renovables.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERO:** Se debe continuar con este tipo de investigaciones para aprovechar el recurso natural geotérmico existente, ya que contamos con numerosos yacimientos y grandes potenciales caloríficos en distintas zonas de nuestra región y del Perú.

**SEGUNDO:** Continuar con la línea de investigación referente al estudio de la producción de energía utilizando el potencial geotérmico de la región.

**TERCERO:** Se recomienda hacer una investigación que busque alternativas energéticas, energía térmica en las viviendas para un sistema de calefacción, y el confort térmico genera la búsqueda de sistemas eficientes. Los sistemas geotérmicos de baja entalpía son muy usados en países con un alto desarrollo siendo altamente eficientes, por lo cual, se debe evaluar estos sistemas basados en la realidad Peruana con el objeto de verificar técnica, económica y legalmente si es factible construir sistemas de calefacción con yacimientos geotérmicos de baja entalpía en el departamento.

**CUARTO:** Se recomienda hacer estudios para saber si es viable construir estos sistemas y que constituyen una buena alternativa si se quiere alcanzar el confort térmico dentro de las viviendas Peruanas, económicamente tiene un costo inicial muy alto, se explica por las perforaciones de los pozos geotérmicos,

por lo cual, se evalúan y propone que el estado invierta en los estudios de nuevos proyectos de investigación para que pueda ser una realidad sistemas de calefacción y tener confort térmico en las viviendas Peruanas.

**BIBLIOGRAFÍA**

- D. KERN. (1999). PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR (1ED.). MÉXICO: MCGRAW HILL.
- ESMAP. (2012). MANUAL DE GEOTERMIA: COMO PLANIFICAR Y FINANCIAR LA GENERACIÓN DE ELÉCRICIDAD. Washintong D.C. EE.UU.: ESMAP.
- Garcia, E. (2012). TERMODINAMICA APLICADA, GUIA DE TEORÍA, EJERCICIOS RESUELTOS Y PROPUESTOS DEL CICLO RANKINE. Mexico: UNEF.
- Grez, S. A. (2007). GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA EN CHILE:ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES PARA SU DESARROLLO SUSTENTABLE. Concepción: UBB.
- Grez, S. A. (2007). GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA EN CHILE:ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES PARA SU DESARROLLO SUSTENTABLE. Concepción Chile: UBB.
- GONZALES, J. (2009). ENERGÍAS RENOVABLES. BARCELONA: REVERTÉ S.A.
- LARA, A. L. (2011). PROYECTO DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA. Quito, Ecuador: EPN.
- M. MORAN & H. SHAPIRO. (2006). FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA TÉCNICA (SED.). INGLATERRA: JOHN WILEY& SON LTD.
- PINEDO MINES, (2015). ANÁLISIS Y EVALUA-CIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA SU APROVECHAMIENTO MEDIANTE UNA CE'NTRAL DE CICLO BINARIO PARA GENERACIÓN DE-POTENCIA ELÉCTRICA EN LA REGIÓN CORONGO-ANCASH, PERÚ, CHIMBOTE, UNS
- SÁNCHEZ, J., SANZ L. &OCAÑA, L. (2011). EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA: ESTUDIO TÉCNICO PER 2011-2020. MADRID: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE).

SHAMES, I. H. (1995). MECANICA DE FLUIDOS (TERCERA EDICION ED.). SANTA FE DE BOGOTA, COLOMBIA: MCGRAW-HILL.

SIAMPERI, R. (2014). METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION . MEXICO, D.F.: MCGRAW-HILL.

SIERRA, J. L. (1998). ENERGIA GEOTÉRMICA. Buenos Aires, Argentina: UBA.

ZAPATA, L. F. (2007). DISEÑO DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 50MW. Lima Perú: UNI.

## ANEXOS

**ANEXO A: PROGRAMA UTILIZADO EES Ver. 6883**

EES Ver. 6.883: #434: For use only by Kwangil Kim of Samsung Electronics Co.

```
Ntv=0.88
Nb=0.8
m_geo=1
T1_geo=63
T2_geo=30
C_geo=4.1858
C=1.794
m_gas=(m_geo*C_geo*(T1_geo-T2_geo))/(C*(T[1]-T[4]))
Ngen=0.96
Ntm=0.87
```

"ESTADO 1"

```
P[1]=10[BAR]
T[1]=60[C]
H[1]=ENTHALPY(Isobutane,T=T[1],P=P[1])
S[1]=ENTROPY(Isobutane,T=T[1],P=P[1])
Tsat[1]=T_SAT(Isobutane,P=P[1])
```

"ESTAD02"

```
S[2]=S[1]
P[2]=0.65[BAR]
H[2]=ENTHALPY(Isobutane,S=S[2],P=P[2])
Hr[2]=H[1]-Ntv*(H[1]-H[2])
T[2]=TEMPERATURE(Isobutane,H=H[2],P=P[2])
Sr[2]=ENTROPY(Isobutane,H=Hr[2],P=P[2])
Tr[2]=TEMPERATURE(Isobutane,H=Hr[2],P=P[2])
```

"ESTADO 3"

```
P[3]=P[2]
X[3]=0
H[3]=ENTHALPY(Isobutane,P=P[2],X=X[3])
S[3]=ENTROPY(Isobutane,P=P[2],X=X[3])
T[3]=T_SAT(Isobutane,P=P[2])
```

N\_planta=(H[1]-Hr[2])/(H[1]-H[4])

"ESTAD04"

```
V[3]=VOLUME(Isobutane,P=P[3],X=X[3])
T[4]=TEMPERATURE(Isobutane,H=H[4],P=P[4])
H[4]=H[3]+V[3]*(P[1]-P[2])*100
P[4]=P[1]
S[4]=ENTROPY(Isobutane,T=T[4],P=P[4])
Sr[4]=ENTROPY(Isobutane,H=Hr[4],P=P[4])
Tr[4]=TEMPERATURE(Isobutane,H=Hr[4],P=P[4])
Hr[4]=H[3]-(H[3]-H[4])/Nb
W_tv=(H[1]-Hr[2])
P_bomba=(H[4]-H[3])*m_gas
P_neta=Ptv-P_bomba
PtV=m_gas*(H[1]-Hr[2])
Pgen=P_neta*Ntm*Ngen
```

Elaboración: Propia.

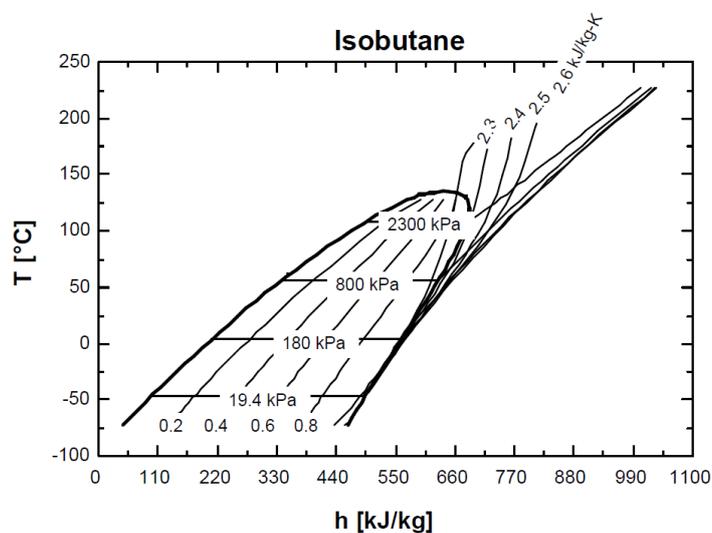
**ANEXO B: RESULTADOS DEL PROGRAMA EES Ver. 6883**

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

C = 1.794      C<sub>geo</sub> = 4.186      m<sub>gas</sub> = 0.5014      m<sub>geo</sub> = 1      Nb = 0.8      Ngen = 0.96      Ntm = 0.87  
 Ntv = 0.88      N<sub>planta</sub> = 0.1556      Pgen = 42.31      Ptv = 51.35      P<sub>bomba</sub> = 0.6907      P<sub>neto</sub> = 50.66      T<sub>1geo</sub> = 63  
 T<sub>2geo</sub> = 30      W<sub>tv</sub> = 102.4

Arrays Table

	H <sub>i</sub> [kJ/kg]	H <sub>r<sub>i</sub></sub>	P <sub>i</sub> [BAR]	S <sub>i</sub> [kJ/kg-K]	S <sub>r<sub>i</sub></sub> [kJ/kg-K]	T <sub>i</sub> [C]	Tr <sub>i</sub> [C]	Tsat <sub>i</sub> [C]	V <sub>i</sub> [m³/kg]	X <sub>i</sub>
1	663.4		10	3.046		60		-58.6		
2	547	561	0.65	3.046	3.098	-10.11	-0.9408			
3	3.851		0.65	0.1262		-94.28			0.001473	0
4	5.229	5.573	10	0.1338	0.1357	-93.56	-93.38			



Elaboración: Propia.

## ANEXO C: FICHA TECNICA DEL ISOBUTANO (R600a)

**ISOBUTANO (R600a)**

El isobutano ó R600a, es un hidrocarburo que se utiliza en algunos equipos de refrigeración, como neveras domésticos, o pequeños aparatos de frío comercial. El R600a tiene una capacidad volumétrica inferior en un 50% al R12 o al R134a, por lo que no se puede considerar un sustituto de éstos.

Es muy importante cuando se trabaja con refrigerantes del tipo hidrocarburo que estos sean de alta pureza, ya que cualquier proporción con otras impurezas, como sulfuros, agua, etc, pueden contribuir a la degradación de los aceites lubricantes de la instalación, rotura de compresores, etc. También ocurre a veces, que si el hidrocarburo no es de alta pureza, pueden ir mezclados con él otros hidrocarburos, pudiendo variar drásticamente las propiedades físicas y termodinámicas del hidrocarburo original.

El isobutano que se utiliza en aplicaciones de refrigeración, no está odorizado como los de uso doméstico (el hidrocarburo doméstico se odoriza para que sea rápidamente detectable en el caso de una fuga), no siendo fácilmente detectable en caso de fugas.

**PROPIEDADES FISICAS DEL ISOBUTANO:**

PESO MOLECULAR	TEMPER. DE EBULLICION (°C)	TEMP. CRITICA (°C)	PRESION CRITICA (BAR, ABS.)	GLIDE DE TEMPER. (°C)	CALOR LATENTE A 25°C (KJ/KG)
58,1	-11,7	135	36,45	0	332

**ACEITES COMPATIBLES:**

El isobutano, lo mismo que el resto de refrigerantes del tipo hidrocarburos, tienen en general muy buena miscibilidad con cualquier tipo de lubricante. Debido a la buena solubilidad que existe entre los aceites minerales y estos refrigerantes, hay sistemas donde puede ser necesario utilizar aceites de mayor viscosidad para compensar ese exceso de solubilidad.

Los lubricantes que contienen silicona ó silicatos no son recomendables. En cualquier caso nuestra recomendación es que se sigan las instrucciones, o se utilicen los lubricantes recomendados por el fabricante del compresor.

LUBRICANTE	COMPATIBILIDAD
MINERAL (M)	Compatible con refrigerantes de tipo hidrocarburos. Presentan excesiva solubilidad en aplicaciones de alta temperatura. Se puede compensar esta situación utilizando aceites minerales de mayor viscosidad
ALQUILBENCENICOS (AB)	Totalmente compatible
SEMISINTETICOS (M+AB)	La mezcla de aceite mineral y alquibencénico es la más apropiada para trabajar con este tipo de

	refrigerantes
POLIOLÉSTER (POE)	Demasiada solubilidad con los hidrocarburos. Puede requerir utilizar POE de mayores viscosidades
POLIALQUILENGLICOLES (PAG)	Solubles con hidrocarburos dependiendo de las condiciones de trabajo
POLIALFAOLEFINAS (PAO)	Soluble con hidrocarburos, recomendado para aplicaciones de baja temperatura

En cualquier caso nuestro consejo es siempre consultar con el fabricante del compresor para determinar el tipo y viscosidad del aceite a utilizar.

**COMPATIBILIDAD CON MATERIALES:**

Casi todos los elastómeros y plastómeros que se pueden encontrar en los sistemas de refrigeración son compatibles con los hidrocarburos. Los materiales que se deben evitar, ya que son incompatibles con ellos son la goma EPDM, gomas naturales y siliconas.

**INFLAMABILIDAD DEL ISOBUTANO**

REFRIGERANTE	LIMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD		TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN (°C)
	EN VOLUMEN (%)	EN PESO (Kg/m3)	
R600a (Isobutano)	1,8	0,043	460

Fuente: (<https://www.construnario.com/ebooks/6730/fluidos%20frigoríficos/refrigerantes/>)

**ANEXO D: PANEL DE FOTOGRAFÍAS**

**Foto:** Yacimiento Geotermal De San Antonio De Putina



Elaboración: Propia.

**FOTO: MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y TOMA DE DATOS**



Elaboración: Propia.

**FOTO: MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y TOMA DE DATOS**



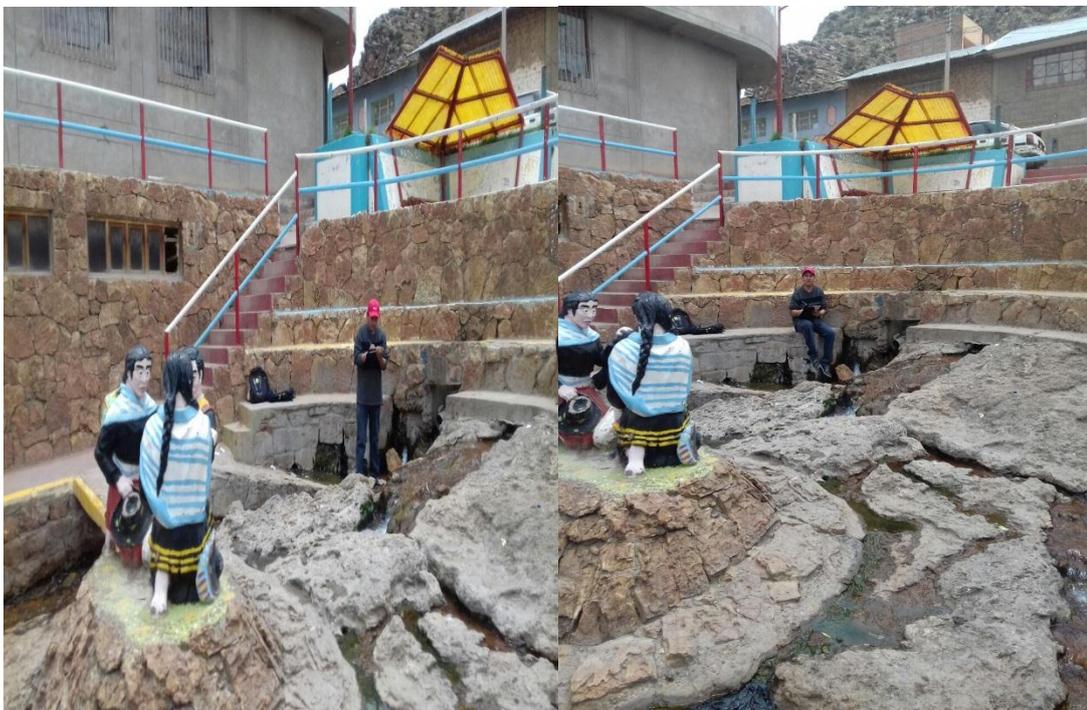
Elaboración: Propia.

**FOTO: MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y TOMA DE DATOS**



Elaboración: Propia.

**FOTO: MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y TOMA DE DATOS**



Elaboración: Propia.