

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



**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA  
FUENTE TERMAL PUENTE BELLO TITIRE, DISTRITO DE  
PICHACANI PUNO, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**ANDRES GUBER MAMANI CHARCA**  
**MILTON JAVIER GUILLEN ALANOCA**

**PARA OPTAR EL TITULO DE:**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2019**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,  
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA FUENTE  
TERMAL PUENTE BELLO TITIRE, DISTRITO DE PICHACANI PUNO,  
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”.

TESIS PRESENTADO POR:

**ANDRÉS GUBER MAMANI CHARCA**

**MILTON JAVIER GUILLEN ALANOCA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**



**APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE** : .....  
M.Sc. MATEO ALEJANDRO SALINAS MENA

**PRIMER MIEMBRO** : .....  
Ing. BENITO HUGO FERNANDEZ OCHOA

**SEGUNDO MIEMBRO** : .....  
M.Sc. JOSE ANTONIO VARGAS MARON

**DIRECTOR DE TESIS** : .....  
M.Sc. ARMANDO TITO CRUZ CABRERA

Área : Mecánica  
Tema : Energía

**FECHA DE SUSTENTACIÓN 20 DE AGOSTO DEL 2019**

## DEDICATORIA

*A nuestras madres Susana Charca Maquera y Inocencia Alanoca Huaricallo, quien nos dio la vida y que siempre concediéndonos todo su cariño y amor, nos fortaleció, para que día a día podemos ser una mejor versión de nosotros mismos.*

*A nuestros padres Edgar Mamani Layme y Jhony Guillen Vilca, que con sus apoyos, siempre nos ayudó y motivo para salir adelante, que sin duda alguna son una de la personas que más apreciamos, admiramos y respetamos por su incondicional amor y entrega.*

*A nuestros hijas e hijos Zoe Milenka Mamani Arazola y Salim joan Guillen Miranda, que siempre están ahí para motivarnos.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradecemos a la vida por habernos dado la posibilidad de vivir momentos extraordinarios y disfrutar del más preciado regalo de Dios en la tierra al lado de nuestros seres queridos.*

*Agradecemos a la Universidad Nacional del Altiplano nuestro alma mater quien nos dio las herramientas y destrezas necesarias para nuestra formación profesional.*

*Agradecemos a nuestra escuela profesional de Ingeniería Mecánica eléctrica, motor y motivo de tantas aspiraciones y logros encontrados a lo largo de nuestras formaciones como profesionales, donde además conocimos muchos amigos que nos hicieron querer y respetar más a nuestra querida escuela.*

*Agradecemos a nuestros docentes quienes nos inculcaron sus conocimientos y que, gracias a ello, pudimos formarnos como un mejor profesional.*

*Agradecemos a todos nuestros amigos quienes siempre le dan un mejor sentido a la vida y quienes siempre nos apoyaron de alguna forma con su sola existencia.*

*Agradecemos a nuestros padres quienes siempre nos apoyaron en nuestra formación como persona y quienes además siempre confiaron en nosotros, todos los triunfos en nuestras vidas se los dedicamos a ellos, porque siempre los llevaremos en nuestro corazón.*

*A todas nuestras infinitas gratitudes.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	11
<b>ABSTRACT</b> .....	12
<b>CAPITULO I</b> .....	13
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>1.2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>1.2.1. OBJETIVO GENERAL</b> .....	15
<b>1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	15
<b>CAPITULO II</b> .....	16
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	16
<b>2.1. Sistemas geotermiales.</b> .....	16
<b>2.2. Geotermia</b> .....	18
<b>2.3. Energías renovables y geotermia.</b> .....	19
<b>2.3.1 Recursos geotérmicos.</b> .....	21
<b>2.3.1.1 Yacimientos de muy baja temperatura.</b> .....	21
<b>2.3.1.2 Yacimientos de baja temperatura.</b> .....	22
<b>2.3.1.3 Yacimientos de media temperatura.</b> .....	22
<b>2.3.1.4 Yacimientos de alta temperatura.</b> .....	22
<b>2.3.2 Clasificación de la energía geotérmica</b> .....	23
<b>2.3.2.1 Alta entalpía</b> .....	23
<b>2.3.2.2 Baja entalpía.</b> .....	24
<b>2.3.2.3 Muy baja entalpía.</b> .....	24
<b>2.4. Potencial de Geotérmico</b> .....	25
<b>2.4.1 Potencial Geotérmico Mundial</b> .....	26
<b>2.4.1.1 Generación de energía geotérmica en el mundo</b> .....	26
<b>2.4.1.2 Situación Actual de la geotermia en América Latina</b> .....	27
<b>2.5. Potencial geotérmico en el Perú</b> .....	31
<b>2.6. Generación eléctrica</b> .....	37

2.6.1	<b>Tipos de centrales de generación geotérmica</b> .....	37
2.6.1.1	Central de vapor seco .....	38
2.6.1.2	Central flash o evaporación súbita .....	39
2.6.1.3	Central de ciclo binario.....	41
2.7.	<b>El ciclo de Rankine</b> .....	43
2.7.1	<b>Funcionamiento del ciclo de Rankine ideal</b> .....	44
2.7.1.1	Eficiencia del ciclo .....	46
2.7.2	<b>Ciclo de Rankine Real</b> .....	50
2.7.2.1	Pérdidas en la turbina .....	52
2.7.2.2	Pérdidas en la bomba .....	53
2.7.3	<b>Ciclo Rankine binario</b> .....	53
2.8.	<b>Hipótesis</b> .....	54
2.8.1	<b>Hipótesis General</b> .....	54
2.8.1.1	Hipótesis Específicas .....	54
2.9.	<b>Variables de estudio</b> .....	55
2.10.	<b>Localización</b> .....	55
CAPITULO III.....		56
3	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	56
3.1	<b>MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	56
3.1.1	<b>Método de la investigación</b> .....	56
3.1.2	<b>Tipo de investigación</b> .....	56
3.1.3	<b>Técnicas de recolección de datos</b> .....	58
3.1.4	<b>Técnicas de análisis de datos</b> .....	59
3.1.5	<b>Unidades de información</b> .....	60
3.1.6	<b>Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos</b> .....	60
3.2	<b>Características del potencial Geotérmico</b> .....	60
3.3	<b>Selección de las características del fluido secundario</b> .....	61
3.4	<b>Calculo de la potencia de Generación eléctrica</b> .....	62

<b>CAPITULO IV</b> .....	69
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	69
<b>4.1 Temperatura de las aguas termales de Puente Bello</b> .....	69
<b>4.2 Selección de las características del fluido secundario</b> .....	72
<b>4.3 Calculo de la potencia de Generación eléctrica</b> .....	75
<b>CONCLUSIONES</b> .....	81
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	82
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	83
<b>ANEXOS</b> .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°2.1 Estructura interna de la tierra.....	16
Figura N° 2.2 Dorsales oceánicas y las fosas abisales.....	17
Figura N° 2.3 Clasificación de la energía geotérmica .....	25
Figura N° 2.4 Evolución de la capacidad geotermo-eléctrica .....	29
Figura N° 2.5 Evolución de la capacidad en el mundo.....	30
Figura N° 2.6 Regiones con potencial geotérmico del Perú.....	35
Figura N° 2.7 Diagrama de una central de vapor seco .....	39
Figura N° 2.8 Diagrama de una central de evaporación súbita o flash.....	41
Figura N° 2.9 Central geotérmica de ciclo binario .....	43
Figura N° 2.10 Ciclo básico de Rankine.....	43
Figura N° 2.11 Representación de este ciclo en el diagrama T-s .....	44
Figura N° 2.12 Representación de este ciclo en el diagrama h-s.....	44
Figura N° 2.13 Desviación del ciclo real de potencia de vapor del ciclo Rankine.....	51
Figura N° 2.14 Efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina. ....	52
Figura N° 2.15 Esquema de una planta geotérmica de ciclo binario.....	54
Figura N° 2.16 Ubicación de la fuente geotérmica.....	55
Figura N° 4.17 Valores de temperatura .....	72
Figura N° 4.18 Diagrama T-S Isobutano .....	74
Figura N° 4.19 Diagrama T-h Isobutano .....	74
Figura N° 4.20 Turbina y generador del ciclo binario.....	78
Figura N° 4.21 Bomba de condensado .....	78
Figura N° 4.22 Pre calentador y evaporador.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1 Países con mayor utilización de la energía geotérmica.....	31
Tabla N° 2.2 Lotes geotérmicos identificados para la explotación .....	36
Tabla N° 3.3 Técnicas e Instrumentos .....	60
Tabla N° 3.4 Formato de Registro .....	61
Tabla N° 3.5 Sustancias Típicas .....	62
Tabla N° 4.6 Temperatura Fuente Termal Puente Bello. ....	69
Tabla N° 4.7 Ubicación Fuente Termal Puente Bello. ....	70
Tabla N° 4.8 Temperatura Fuente Termal Puente Bello Febrero .....	70
Tabla N° 4.9 Temperatura Fuente Termal Puente Bello Marzo .....	71
Tabla N° 4.10 Temperatura Fuente Termal Puente Bello Abril .....	71
Tabla N° 4.11 Propiedades termodinámicas de fluidos de trabajo .....	73
Tabla N° 4.12 Propiedades medioambientales, seguridad y salud .....	73
Tabla N° 4.13 Parámetros Fuente termal Puente Bello .....	75

## 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.

$W_B$  = 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.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se focaliza en la evaluación del potencial geotérmico para determinar la capacidad del aprovechamiento del recurso geotérmico que se ubica a las faldas del cerro Puente Collo, en el sector de Titire, distrito de Pichacani, provincia y departamento de Puno, Se enmarca dentro de la investigación cuantitativa, descriptiva correlacional, sobre el río Titire. El proyecto de tesis tiene como objetivo principal la Evaluación del Potencial Geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, para la Generación de Energía Eléctrica; como objetivos específicos se realizara la evaluación de las características del potencial geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello, que permitirá adoptar la mejor tecnología en cuanto a la eficiencia termodinámica que se podrá analizar lo que a la vez nos permitirá realizar el segundo objetivo específico que corresponde al de seleccionar e identificar las características del fluido secundario de trabajo para el aprovechamiento de energía geotérmica el cual nos permite realizar el estudio termodinámico del fluido de trabajo y el ciclo termodinámico para poder determinar las entalpías y el trabajo termodinámico del ciclo lo que nos conduce al tercer objetivo del presente proyecto de investigación y el más importante el cual es determinar la potencia de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de la fuente termal Puente Bello que se podría generar el cual es el principal aporte de la presente investigación y la cual se podría también replicar en las distintas fuentes termales existentes en la región.

Palabras clave: Ciclo termodinámico, entalpía, energía eléctrica, fluido de trabajo, fuente termal, potencia eléctrica.

## ABSTRACT

This research work focuses on the assessment of the geothermal potential to determine the capacity of the exploitation of the geothermal resource that is located in the foothills of Mount bridge Ccollo, in the sector of Sandfly, Pichacani district, province and Department of Puno, is part of the quantitative, descriptive correlational research. on the river Titire. The thesis project has as main objective the evaluation of the potential geothermal in the source thermal bridge beautiful Sandfly, district of Pichacani Puno, for the generation of electrical energy; specific objectives will be the evaluation of the characteristics of the geothermal potential of the thermal spring bridge Bello, which will adopt the best technology in terms of the thermodynamic efficiency that you can analyze which at the same time will allow us perform the second specific objective which corresponds to the select and identify the characteristics of the secondary working fluid for the exploitation of geothermal energy, which allows us to make the thermodynamic study of the working fluid and the cycle thermodynamic in order to determine the enthalpies and the thermodynamic work cycle that leads us to the third objective of the present research project and the most important of which is to determine the power of electricity generation through the use thermal supply beautiful bridge that could generate which is the main contribution of this research and which could also be replicated in different thermal sources existing in the region.

Key words: thermodynamic cycle, enthalpy, electric power, fluid, thermal spring, electric power.

## CAPITULO I

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del cambio climático producido por acciones indebidas e inconscientes de los seres humanos y factores naturales han puesto en alerta a los gobiernos a nivel mundial. Actualmente existe un desconocimiento en el tema de recursos geotérmicos, así como un desinterés en la difusión por parte de las autoridades responsables del manejo de dicho recurso en el Perú, especialmente en la Región Puno. En la cumbre de la Organización de las Naciones Unidas, desarrollado en Rio de Janeiro, se acordó crear un Ministerio del Ambiente en todos los países del mundo y generar electricidad mediante Energías Renovables. Desde tiempos prehispánicos, en el Perú se le dio a la geotermia un uso balneoterápico, siendo mundialmente conocido, los Baños del Inca en Cajamarca. En el Perú nos falta trabajar en Energías Renovables y los recursos geotérmicos sólo son considerados en concesiones temporales para estudios.

La intención del gobierno no considera el uso de la Energía geotérmica en su gestión. A diferencia de otros países, en nuestro país todavía no se utiliza potencial Geotérmico para la generación de energía eléctrica. En la Región Puno hay una amplia cantidad de fuentes hidrotermales, conocida también como “fuentes de aguas calientes”, cuyo uso principal es para el esparcimiento de la sociedad y visitantes. Por lo que existe conocimiento parcial y sectorizado de los recursos geotérmicos, con destino recreativo y turístico.

La investigación se centrará en el área de influencia el proyecto que es la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno.

El presente proyecto nos muestra la posibilidad de realizar el aprovechamiento de la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, para la generación de energía eléctrica de pequeña potencia.

El estudio planteado, ha sido elegido por la 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 aprovechamiento de la energía geotérmica mediante ciclo binario, este tipo de tecnología se utiliza cuando la temperatura del fluido no es muy elevada son las llamadas centrales de baja entalpia o el ciclo de Rankine binario.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del presente proyecto es realizar la Evaluación del Potencial Geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, para la Generación de Energía Eléctrica.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar las características del potencial geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello.
- Seleccionar e identificar las características del fluido secundario de trabajo para el aprovechamiento de energía geotérmica.
- Determinar la potencia de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de la fuente termal Puente Bello.

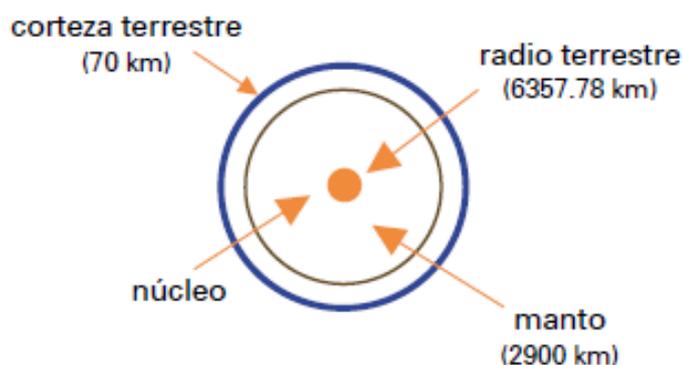
## CAPITULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Sistemas geotermales.

En forma esquemática y simple, se puede considerar que la tierra está conformada por tres capas concéntricas, desde la superficie hasta su centro, ubicado a una profundidad de 6.357,78 km. Estas tres capas son: La superficial denominada CORTEZA TERRESTRE, está constituida por rocas en estado sólido y que podemos observar en forma directa. Su espesor rara vez supera los 70 km. (Fig. N°1).

**Figura N° 2.1: Estructura interna de la tierra**



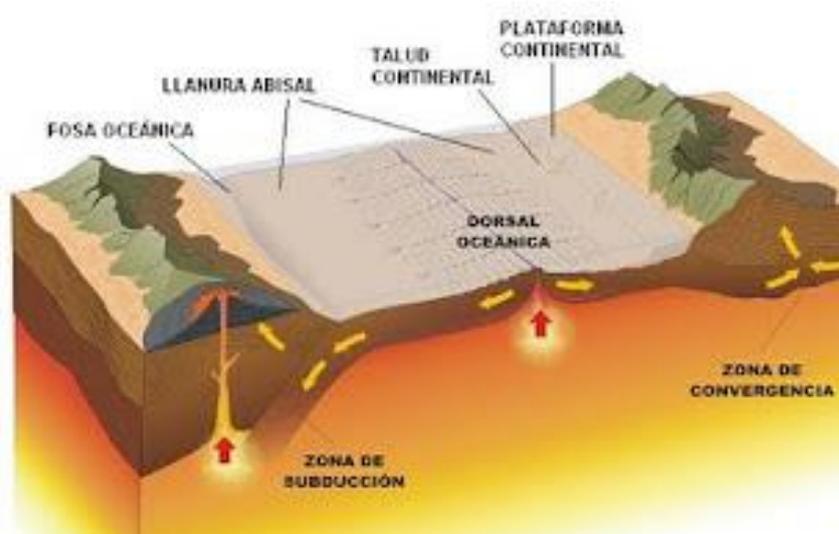
Fuente: <http://www.energia.gov.ar>

La segunda capa, denominada MANTO, se halla inmediatamente debajo de la anterior. Los materiales que la constituyen tienen una composición mineralógica completamente distinta de las de las rocas de la parte superficial, y una densidad bastante mayor.

Debido a las altas temperaturas existentes a esas profundidades y a la naturaleza de su constitución, esos materiales se hallan en estado semifundido, otorgándole

al manto un comportamiento dinámico semejante al de una masa plástica. Si bien no se puede comprobar visualmente, estudios geofísicos permiten suponer que las características observadas en la parte superior del manto se acentúan gradualmente hasta la profundidad de 2.900 Km. A partir de allí nos internamos en la tercera capa denominada NÚCLEO caracterizada porque los componentes minerales que la constituyen poseen una densidad muy superior a las de las capas anteriores.

**Figura N° 2.2: Dorsales oceánicas y las fosas abisales**



Fuente: <https://elcapitanemo.webnode.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. (SIERRA, 1998).

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.

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

## 2.2. Geotermia

Esta es una palabra de origen griego, derivada de "geos" que quiere decir tierra, y de "thermos" que significa calor: el calor de la tierra (Llopis Trillo, 2008).

El calor es una forma de energía, y la energía geotérmica es, literalmente, el calor contenido en el interior de la tierra, la cual genera un fenómeno geológico a escala planetaria (Dickson, 2004).

La valoración de recursos geotérmicos puede definirse como la estimación de recursos de energía geotérmica que pueden llegar a estar disponibles para ser utilizados, dadas determinadas suposiciones razonables sobre tecnología, economía, política, y contrastes ambientales. Esta valoración implica no únicamente determinar cómo está distribuida, sino también cuanta de esta energía puede ser extraída para ser utilizada por el hombre. El recurso propiamente dicho, es la energía térmica ubicada a profundidades que sean lo suficientemente someras como para poder acceder a ellas mediante perforaciones de manera tecnológica, legal y económicamente viables. (Santilli, 2014)

Debido a que la preocupación sobre el impacto que tienen las actividades humanas sobre el ambiente ha crecido, es que hay un aumento en el foco que se hace en el

papel que juegan las energías de fuentes renovables para proveer energía limpia. La energía geotérmica es una de las mejores alternativas a las energías de fuentes tradicionales, debido a que es renovable, una fuente energética casi infinita y es independiente de las fluctuaciones estacionales o las condiciones climáticas (Bonté, 2012).

### **2.3. Energías renovables y geotermia.**

Las energías renovables son aquellas energías que provienen de recursos naturales que no se agotan y a los que se puede recurrir de manera permanente. Su impacto ambiental es nulo en la emisión de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>.

Se consideran energías renovables: la energía solar, la eólica, la geotérmica, la hidráulica y la eléctrica. También pueden incluirse en este grupo la biomasa y la energía mareomotriz.

La energía geotérmica es el recurso energético más grande que existe.

Es una energía que se califica como renovable y sustentable.

Renovable es una propiedad de las fuentes energéticas primarias que tienen su origen en la radiación del sol, en ellas se incluye la Geotermia que, a diferencia del resto de las energías renovables, su origen proviene del calor interior de la tierra que se alimenta de la desintegración de isótopos radiactivos, de movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra y del calor latente de cristalización del núcleo externo. (IDAE, 2008).

Sustentable, según la Comisión Mundial del Desarrollo y Medio Ambiente, 1987 “satisface las necesidades de la actual generación sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones” (EXPÓSITO, 2015)

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. (Grez, GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA EN CHILE:ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES PARA SU DESARROLLO SUSTENTABLE, 2007).

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, GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA EN CHILE:ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES PARA SU DESARROLLO SUSTENTABLE, 2007).

### **2.3.1 Recursos geotérmicos.**

Se considera recurso geotérmico a toda la energía térmica almacenada entre la corteza terrestre que podría ser explotada en los próximos 40-50 años. 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.

Reservas geotérmicas son la fracción de los recursos geotérmicos que pueden ser explotados económicamente en los próximos 10-20 años. (EXPÓSITO, 2015)

Con respecto a los tipos de recursos geotérmicos de forma general, se adopta una clasificación basada en el nivel de temperatura:

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

Es la energía almacenada en el terreno o en las aguas subterráneas a temperaturas inferiores a 30°C, es decir prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta. En cualquier punto se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo; para climatización de casas individuales y edificios por intermedio de bombas de calor geotérmicas. Hasta aproximadamente 10 a 15 m. de profundidad las temperaturas del subsuelo son variables en función de las variaciones estacionales. (EXPÓSITO, 2015).

### **2.3.1.2 Yacimientos de baja temperatura.**

Temperaturas entre 30 y 90 ° C. Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.500 y 23.500 metros, o a profundidades inferiores a los 1.000 metros en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Suelen requerir una demanda de energía calorífica en las proximidades. Una de las mayores fuentes de calor terrestre es la desintegración de los isótopos radiactivos presentes en las rocas, ese calor varía en función de la composición química y la edad de las rocas, por esa razón los gradientes geotérmicos son más elevados en cuencas sedimentarias jóvenes. Se utilizan para usos térmicos en sistemas de calefacción/climatización y ACS urbanos, y en diferentes procesos industriales. (EXPÓSITO, 2015).

### **2.3.1.3 Yacimientos de media temperatura.**

Temperaturas entre 90 y 150° C. Se encuentran en cuencas sedimentarias, pero a profundidades 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 1.000 m. Se diferencia de los yacimientos de alta temperatura en que no existe capa impermeable sobre el acuífero que mantenga el calor y la presión en el yacimiento, como en los de alta temperatura. Se utilizan en centrales de generación eléctrica. (EXPÓSITO, 2015).

### **2.3.1.4 Yacimientos de alta temperatura.**

Su temperatura es superior a los 150° C. Son zonas que suelen coincidir con fenómenos geológicos notables (actividad sísmica elevada, formación de

cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica reciente y regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas litosféricas). Se sitúan a profundidades muy variables, son frecuentes a profundidades entre los 1.500 y 3.000 m. Se producen como consecuencia de los movimientos de convección de masas de rocas fundidas, magmas, procedentes del manto y por los movimientos de las distintas placas litosféricas que forman la litosfera terrestre. (EXPÓSITO, 2015).

### **2.3.2 Clasificación de la energía geotérmica**

#### **2.3.2.1 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. (LARA, 2011)

En algunas zonas del planeta podemos encontrar (con relativa facilidad y dependiendo de la topografía) que esta energía calórica afecta a grandes volúmenes de suelo o napas de agua. En algunos casos el agua entra en ebullición y encuentra escape a la superficie como grandes chorros de vapor. En otros casos el calor está almacenado en la tierra y las piedras, y para extraerlo se inyectan toneladas de agua que se evaporan y vuelven a la superficie con un gran nivel energético (Vercelli, 2012).

La zona geotérmica es una definición geográfica, que usualmente indica un área con actividad geotermal en la superficie terrestre. En casos sin actividad superficial, este término se puede utilizar para indicar el área de la superficie que corresponde al reservorio geotermal que se encuentra debajo (Dickson, 2004).

El recurso geotérmico de alta entalpía se puede aprovechar por utilización directa del calor para calefacción, o por medio de la generación de electricidad a partir del uso del vapor en turbinas. En el caso de la generación de energía eléctrica, las instalaciones son similares a las de las centrales térmicas, la diferencia es que el vapor no se genera quemando derivados del carbón, petróleo o gas sino que se obtiene directamente de la energía geotérmica (Farré, 2006).

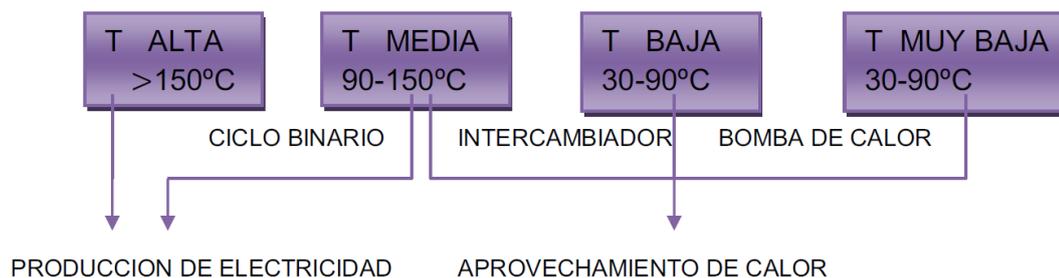
#### **2.3.2.2 Baja entalpía.**

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. (LARA, 2011).

#### **2.3.2.3 Muy baja entalpía.**

La temperatura dentro de los primeros metros debajo de la superficie del suelo, suele estar alrededor de los 15°C, y en promedio corresponde a la temperatura media ambiental (Dickson, 2004).

La aplicación más común que se le da a la energía geotérmica en la agricultura, es para el calentamiento de invernaderos. El cultivo de vegetales y flores fuera de estación, o en un clima que no es similar a su clima natural, ahora puede realizarse gracias a una amplia y experimentada tecnología. (Santilli, 2014).

**Figura N° 2.3: Clasificación de la energía geotérmica**

Fuente: (LARA, 2011).

#### 2.4. Potencial de Geotérmico

El potencial aprovechable de energía geotérmica en varias partes del mundo es mucho mayor que la utilización actual, y la energía geotérmica tiene un importante papel que desempeñar dentro de los sistemas de energía de muchos países. Se ha calculado que aproximadamente 40 países en todo el mundo poseen suficiente potencial geotérmico que podría, desde una perspectiva puramente técnica, satisfacer su demanda de electricidad completa. Se han identificado recursos geotérmicos en casi 90 países y más de 70 países ya cuentan con alguna experiencia en el uso de energía geotérmica. Actualmente, en 24 países se produce electricidad proveniente de energía geotérmica. Estados Unidos y Filipinas tienen la mayor capacidad de energía geotérmica instalada: aproximadamente 3,000 y 1,900 MW, respectivamente. Islandia y El Salvador generan hasta el 25% de su energía eléctrica mediante recursos geotérmicos. Aunque la energía geotérmica tiene potencialmente varios usos, incluida la calefacción directa, este manual se enfoca específicamente en el desarrollo de recursos para la generación de electricidad. (ESMAP, 2012)

### 2.4.1 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).

#### 2.4.1.1 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)

#### **2.4.1.2 Situación Actual de la geotermia en América Latina**

La utilización de recursos geotérmicos para generación de electricidad celebró su centenario en 2014. En 1904, en Larderello (Italia) el Príncipe Piero Ginori Conti ideó y realizó el primer experimento de generación eléctrica utilizando vapor geotérmico. Logró generar una pequeña cantidad de energía con una máquina de vapor a pistón de 0,4 kW, suficiente para encender cinco bombillas, pero el éxito obtenido abrió el camino al desarrollo comercial de la geotermo-electricidad, que se concretizó en 1913 con la entrada en operación de la primera planta con una turbina de vapor de 250 kW. Treinta años después, en vísperas de la segunda guerra mundial, la industria geotermo-eléctrica en Larderello se había exitosamente consolidado, alcanzando una capacidad instalada de 127 MW en 1942.

La experiencia italiana despertó pronto el interés para la geotermo-electricidad en otros países. Nueva Zelanda empezó en 1918 a interesarse en los emprendimientos geotérmicos italianos y en posibles aplicaciones en su territorio, Japón perforó sus primeros pozos geotérmicos en Beppu en 1919, Estados Unidos realizó perforaciones en The Geysers en 1921 e instaló una planta geotérmica experimental de 20 kWe, que operó entre 1925 y 1958.

En América Latina, Chile fue también parte en esa labor pionera, con la ejecución de estudios y perforaciones en la zona termal de El Tatio entre 1921

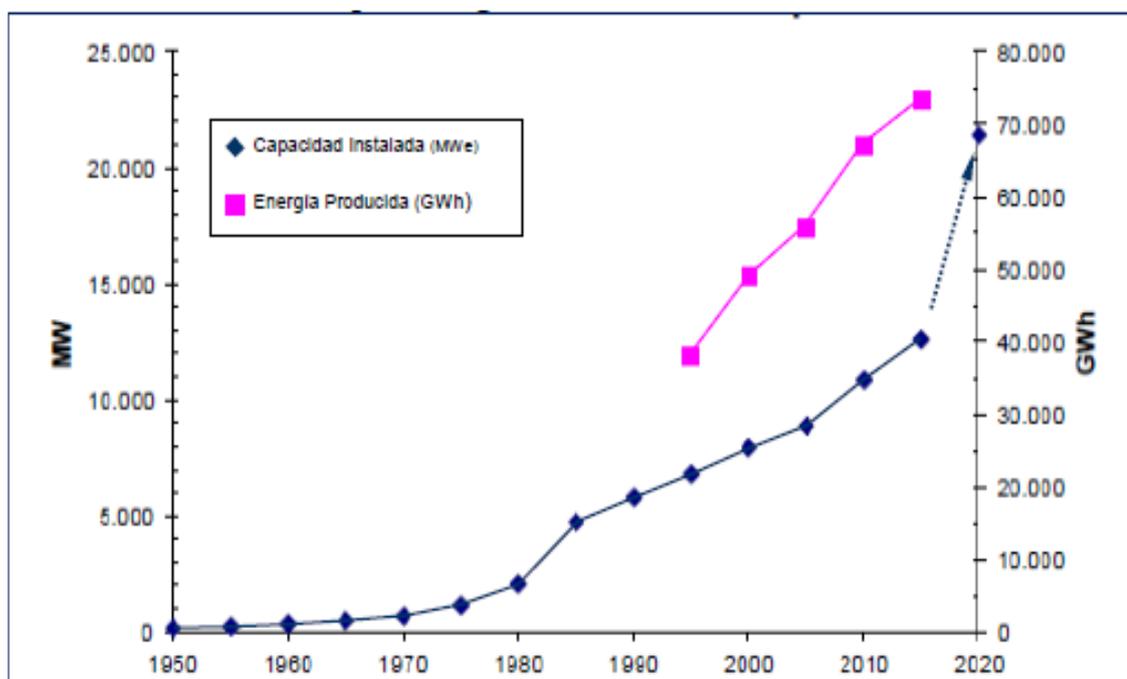
y 1923, con la colaboración de técnicos italianos. El objetivo era la generación de electricidad para las florecientes industrias mineras atacameñas y los estudios realizados en ese entonces llevaron a una estimación de capacidad de generación eléctrica de 50 MW (Tocchi, 1923). Sin embargo el proyecto no prosperó.

Fue hasta después de la segunda guerra mundial, a finales de los años '50, que la utilización de recursos geotérmicos para generación de electricidad logró iniciar efectivamente su expansión afuera de la cuna italiana. Entre 1954 y 1958 entraron en operación las primeras plantas en Nueva Zelanda, en Kawerau y Wairakei, en 1958 una pequeña planta experimental en Pathé, México, y en 1960 la primera planta en el campo de The Geysers, en Estados Unidos. A continuación muchas otras naciones se fueron progresivamente sumando hasta llegar a la situación actual, en la cual la energía geotérmica es utilizada para generación de electricidad en 26 países, con una capacidad instalada global de casi 13 GW (Fig. 4). La capacidad individual instalada varía entre 0,1 MW en Rumanía y Taiwan y 3.450 MW en Estados Unidos (Bertani, 2015).

El crecimiento de la capacidad geotermo-eléctrica instalada ha sido paulatino hasta inicios de los años 70, luego la primera crisis mundial del petróleo de 1973 indujo por primera vez muchos países a interesarse en recursos energéticos alternativos a los hidrocarburos, impulsando el crecimiento del sector geotérmico. La geotermia, con sus ventajas de recurso autóctono, generación de carga base y modestos impactos ambientales, se volvió en un tema de particular interés en los países con características geológicas apropiadas para la existencia de recursos de alta temperatura, es decir en las

regiones ubicadas en correspondencia de márgenes de placas tectónicas y afectadas por vulcanismo reciente ). (Bona & Coviello, 2016).

**Figura N° 2.4: Evolución de la capacidad geotermo-eléctrica**

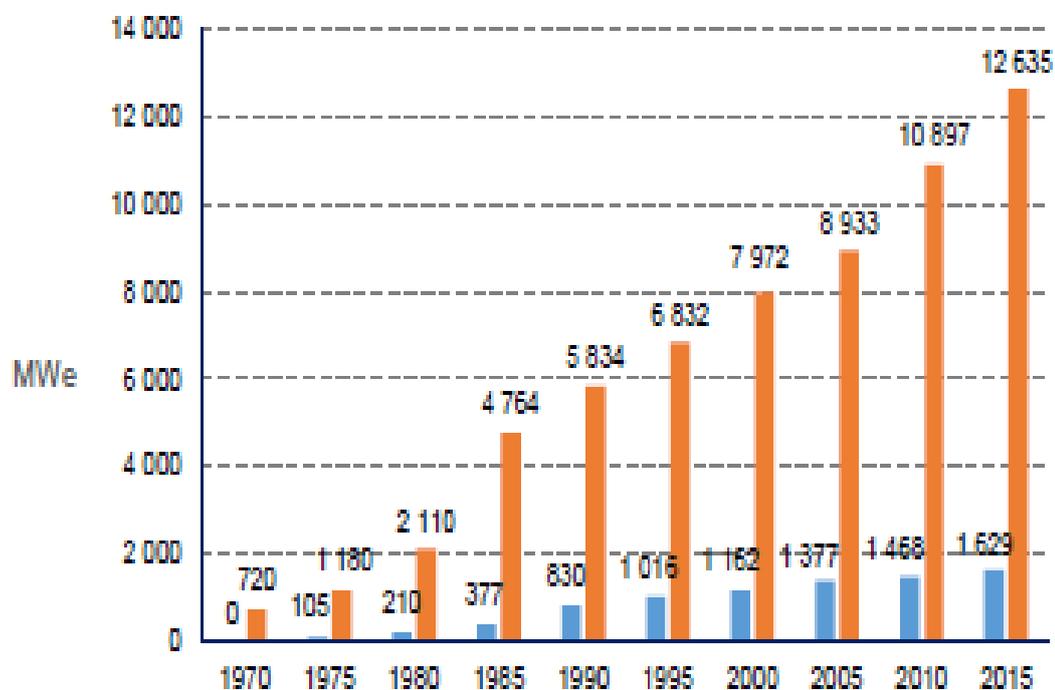


Fuente: (Bona & Coviello, 2016).

América Latina, con su excelente ubicación a lo largo del cinturón volcánico circumpacífico, no quedó atrás. En los años '70 y '80, con el apoyo técnico y financiero de varias instituciones y organismos internacionales, los gobiernos de la mayoría de países centroamericanos y andinos se dedicaron a la investigación de sus territorios en búsqueda de recursos geotérmicos. Los resultados no tardaron en llegar: México en 1973 y El Salvador en 1975, fueron los primeros países latinoamericanos en generar electricidad con fuentes geotérmicas; luego siguieron Nicaragua en 1983, Costa Rica en 1994 y Guatemala en 1998. Actualmente, América Latina cuenta con una capacidad geotermo-eléctrica instalada de 1.629 MW.

Es interesante observar que la capacidad geotermo-eléctrica instalada en América Latina, es decir en una de las regiones con condiciones geológicas más favorables para la explotación del recurso geotérmico, corresponde solamente al 13% de la capacidad instalada mundial, y éste corresponde esencialmente a la subregión mesoamericana, ya que en América del Sur no existen plantas geotermo-eléctricas en operación.

**Figura N° 2.5 Evolución de la capacidad en el mundo**



Fuente: (Bona & Coviello, 2016)

**Tabla N° 2.1: Países con mayor utilización de la energía geotérmica**

PAÍS	POTENCIA INSTALADA (MW)
Estados Unidos	2850
Filipinas	1931
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

Fuente: Geothermal Energy

## 2.5. Potencial geotérmico en el Perú

Se han realizado los siguientes avances hasta la fecha:

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

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

En 1977, el INIE efectuó el primer censo de manifestaciones geotermales

En 1978, el INGEMMET elaboró un inventario y agrupación geográfica de afloramientos geotermales, se identificaron las siguientes regiones geotérmicas (ZAPATA, 2007).

Entre 1979 y 1980, con el apoyo de OLADE, la investigación geotérmica fue concentrada en la cordillera volcánica del sur de Perú, mediante estudios de reconocimiento llevados a cabo por la empresa italiana Aquater, en colaboración con el INGEMMET. En 1980 también la empresa Geothermal Energy Systems Ltd efectuó estudios en el sur de Perú, en las zonas de Calacoa, Salinas Grandes y Tutupaca. Entre 1982 y 1986 el reconocimiento geotérmico nacional fue extendido a la región noroeste del Perú, mediante un convenio de cooperación con el Gobierno de Italia, ejecutado por la generadora estatal Electro Perú con la participación de la empresa italiana CESEN.

Paralelamente, entre 1983 y 1985, el INGEMMET amplió la investigación geotérmica nacional a la región de Puno-Cuzco, con el apoyo del Servicio Geológico Británico (Verastegui, 1988; Fidel, 2008; Cruz y Vargas, 2015).

Durante la segunda mitad de los años '80 y los '90 la investigación geotérmica continuó principalmente enfocada en la cordillera volcánica del sur del Perú, donde los estudios anteriores parten realizados de forma independiente por el INGEMMET, Electro Perú (CENERGIA a partir de 1993139), y el Proyecto Especial Tacna del Gobierno Regional de Tacna, y en parte con el apoyo de organismos internacionales como: la OIEA en 1986, la CEPAL en 1997, Sandia National Laboratories en 1998, y el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México (IIE) en 1996-1999. Estas actividades investigaron principalmente el sector comprendido entre los volcanes Tutupaca y Casiri en la Región de Tacna, y el Valle del Colca en la Región de Arequipa, pero el nivel de

los estudios prácticamente no pasó del reconocimiento geológico y geoquímico (Battocletti y Lawrence, 1999; Fidel, 2008).

Entre 1997 y 2003 el INGEMMET realizó un nuevo inventario nacional, con caracterización detallada de 537 manifestaciones termales y minerales, cuyos resultados fueron publicados en seis Boletines de la institución<sup>140</sup>. Luego, con toda la información recolectada durante más de 30 años de investigaciones, y por encargo del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), en el 2006 el INGEMMET inició a trabajar en un “Proyecto de Evaluación del Potencial Geotérmico del Perú, el cual produjo inicialmente un nuevo mapa geotérmico, publicado en el 2010 (Fidel, 2008; Vargas y Cruz, 2010, Vega, 2013).

Con la iniciativa del Ministerio de Energía y Minas y el apoyo de la Cooperación Técnica Italiana (CTI) en la década de los ochenta se contrató a la empresa consultora CENERGIA para estudios preliminares de los recursos geotérmicos en nuestro país. (ZAPATA, 2007).

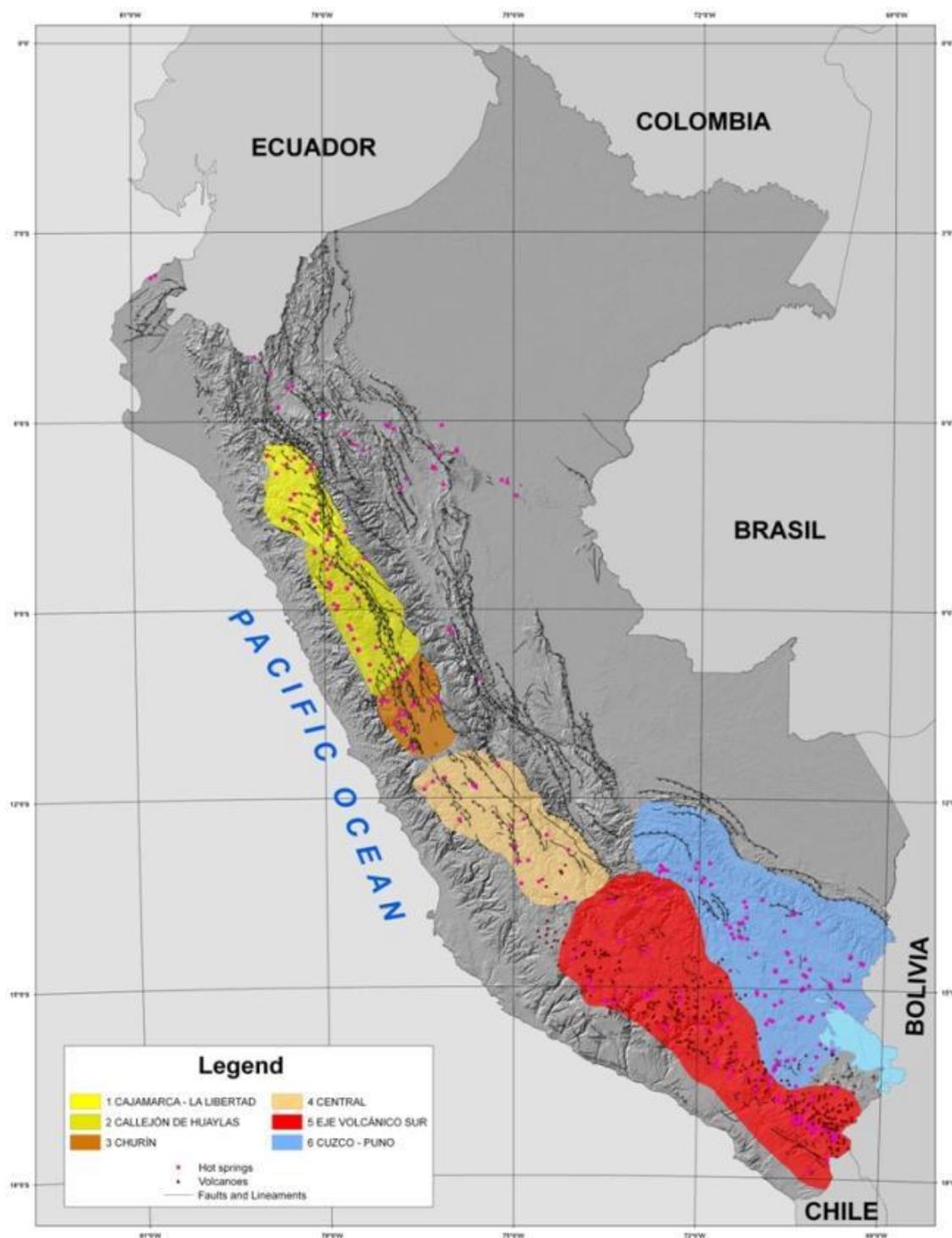
A partir del 2007 el programa geotérmico de INGEMMET recibió apoyo del Gobierno del Japón. En 2007-2008, mediante la asistencia del Banco de Cooperación Internacional del Japón (JBIC), la atención fue concentrada en las áreas geotérmicas de Borateras y Calientes, en la cordillera volcánica del sur de Perú, donde la empresa japonesa West-Jec, en colaboración con el INGEMMET, llevó a cabo un programa de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas a nivel de prefactibilidad. (Bona & Coviello, 2016)

Luego, en diciembre del 2009 el MINEM suscribió un acuerdo de cooperación técnica con JICA para la ejecución de estudios finalizados a la preparación de un “Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú”. El Plan Maestro fue completado en el 2012. Entre sus principales contenidos se encuentra una base de datos con

recopilación de información sobre el recurso geotérmico a nivel nacional, la evaluación del potencial del recurso y la definición de una hoja de ruta para el desarrollo de la energía geotérmica en el país (Fidel, 2008; MINEM-JICA, 2012; Vega, 2013).

A partir de 2010, y paralelamente a la ejecución del Plan Maestro, la emisión de un nuevo reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, movilizó a varias empresas privadas interesadas en explorar recursos geotérmicos en el país. Entre 2010 y 2012 el MINEM recibió numerosas solicitudes de autorización de exploración, muchas de las cuales correspondientes a lotes parcialmente sobrepuestos, de diferentes empresas en competición para áreas de particular interés geotérmico. El MINEM llegó a otorgar hasta 32 autorizaciones de exploración a 6 diferentes empresas, nacionales y extranjeras, pero el desarrollo geotérmico no ha tenido un avance sustancial y las autorizaciones vigentes se redujeron a 20 a finales del 2015 (Claros, 2014; Claros, 2015). La mayoría de las empresas no ha avanzado significativamente con los programas de exploración, en parte por falta de financiamiento y en parte por otros problemas, como han sido: aspectos regulatorios y administrativos, restricciones ambientales, temas sociales, y más en general la débil articulación entre los actores clave del sector (Muñoz et al., 2014; Vega, 2015).

Figura N° 2.6: Regiones con potencial geotérmico del Perú



Fuente: INGEMET 2010.

El Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica completado en 2012 por MINEM-JICA provee la información más detallada disponible en cuanto a perspectivas

de explotación del recurso geotérmico en el Perú. El estudio identificó 61 campos geotérmicos potenciales, cuatro de los cuales (Tutupaca, Calientes, Boratera, Ancocollo) están caracterizados mediante estudios de superficie avanzados (geología, geoquímica y geofísica), 11 cuentan con estudios de reconocimiento geológico y geoquímico básicos, y otros 46 están identificados esencialmente por interpretación de características y distribución de manifestaciones termales. Con base en los datos proporcionados por MINEM-JICA (2012),

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

**Tabla N° 2.2: 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 Cujone, 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 Toquepala * Ampliación de Cujone * Ampliación de Quellaveco * Programas de desarrollo industrial de las futuras inversiones en la región
	CHALLAPALCA	Altiplano de los departamentos de Tacna y parte de Puno	Na/K	: 180 - 190°C	
			SiO <sub>2</sub>	: 192°C	
			Na/K	: 182 - 232°C	
			Na/K/Ca	: 184 - 212°C	
			Na/K/Ca/Mg	: 184 - 240°C	
3	AREQUIPA	Departamento de Arequipa	SiO <sub>2</sub>	: 170°C	* Instalación de una planta geotérmica mediana (50 MW) * Potenciamiento del turismo en el Valle del Colca
		Lagunas Salinas - Chachani	SiO <sub>2</sub>	: 190°C	
		Laguna Chivay			
		Laguna Calloma			

(ZAPATA, 2007)

## 2.6. Generación eléctrica

La capacidad instalada de generación de la planta puede determinarse con base en el mercado de energía y la productividad actual del yacimiento (este se realiza por medio de la simulación del modelo matemático de la reserva). El ciclo térmico se selecciona, de acuerdo con características del fluido, pero también tomando en consideración las condiciones económicas del proyecto (HERRERA & JERI, 2017).

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, transportarán el fluido de forma concentrada a la superficie, donde esta energía térmica será convertida en electricidad en una central de energía geotérmica. (GALANTE, 2007).

En general se tienen tres ciclos, para la producción de energía eléctrica:

- Ciclo con unidades de contrapresión
- Ciclo con unidades de condensación
- Ciclo binario

### 2.6.1 Tipos de centrales de generación geotérmica

La tecnología para la generación de electricidad depende críticamente de las características del recurso geotérmico, no sólo de la temperatura y presión del fluido, sino también de su salinidad y contenido de otros gases, pues todo ello afectará a la eficiencia y diseño de la planta. Las centrales eléctricas pueden ser de tres tipos fundamentalmente: vapor seco, vaporización súbita y ciclo binario. (GALANTE, 2007).

### 2.6.1.1 Central de vapor seco

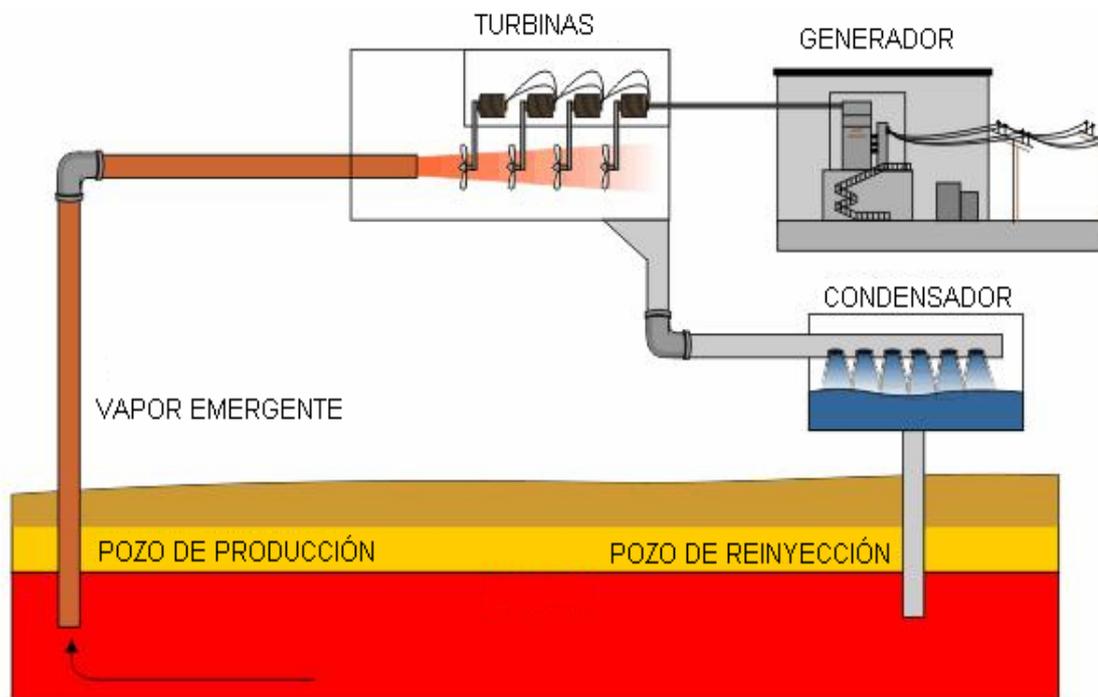
Este sistema se utiliza en recursos geotérmicos del tipo *vapor dominante*, donde el vapor no está prácticamente mezclado con el agua. Se extrae vapor sobrecalentado, típicamente a temperaturas de 180-185 °C y 0.8-0.9 MPa, que alcanza la superficie a alta velocidad. Con objeto de aumentar la eficiencia en la producción de electricidad, se han llegado a explotar recursos con temperaturas superiores a los 300 °C. (GALANTE, 2007).

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).

La conexión entre los pozos y la casa de máquinas es la más sencilla de los tres tipos principales de plantas. En la cabeza de los pozos se instalan válvulas y purificadores de vapor, que consisten simplemente en separadores centrífugos que se encargan de eliminar las partículas sólidas que pueda haber en el vapor, antes de que éste se introduzca en el sistema de tuberías de distribución. A lo largo de estas tuberías se sitúan estratégicamente una serie de trampillas con el fin de extraer el vapor condensado. Este condensado es transportado por una red de alcantarillados hasta las lagunas de tratamiento y finalmente a los pozos de reinyección en frío. Por lo general estos pozos se

ubican en un sector del yacimiento, donde el líquido frío que se reinyecta no altere la temperatura del resto del campo geotérmico. (GALANTE, 2007).

**Figura N° 2.7: Diagrama de una central de vapor seco**



Fuente: (GALANTE, 2007)

### 2.6.1.2 Central flash o evaporación súbita

Este sistema se utiliza en recursos geotérmicos del tipo *líquido dominante*, que son los de mayor distribución en el mundo.

Una vez comprobada la existencia del campo geotérmico, se procede a perforar el pozo productor, hasta llegar a una de las fracturas del yacimiento. De estos pozos productores se extrae el fluido bifásico (líquido caliente y vapor) proveniente del yacimiento o reservorio geotérmico, el cual se transporta a través de una tubería superficial especial llamada vaporducto. (GALANTE, 2007).

El recurso hidrotérmico 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. (LARA, 2011).

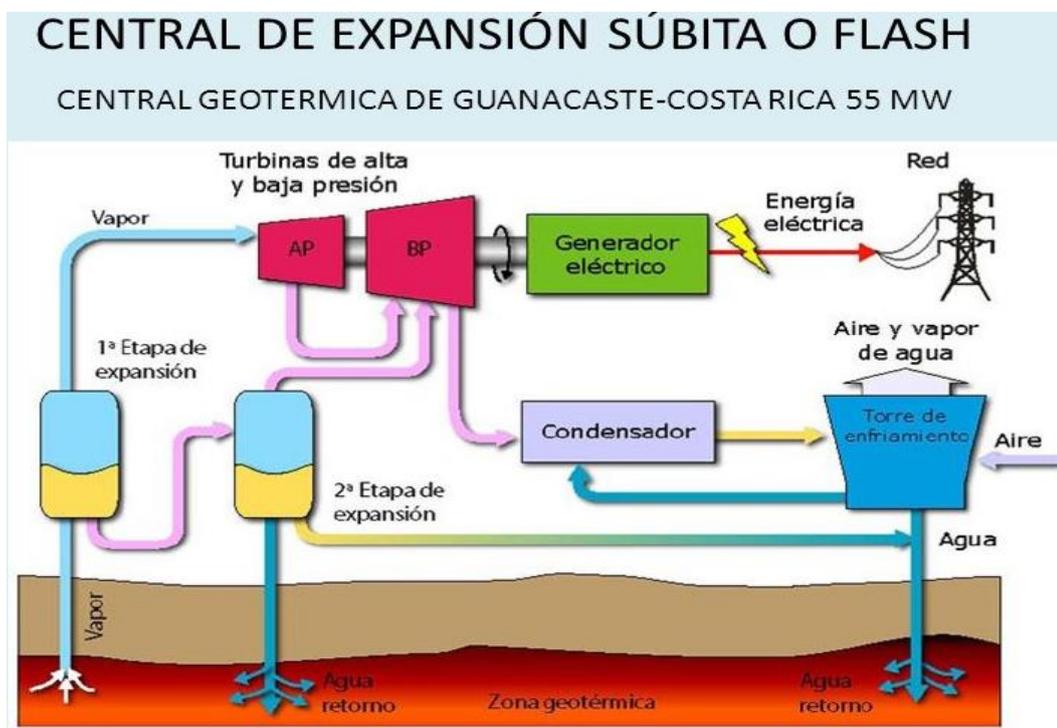
Por tanto, lo primero que se hace con la mezcla bifásica extraída es transportarla por medio de los vaporductos hasta un **separador ciclónico**. Estos separadores, de forma cilíndrica y normalmente orientados con el eje en posición vertical, se encargan de separar la mezcla bifásica en las fases diferenciadas de líquido y vapor debido a la gran diferencia de densidad entre ambas fases, con una pérdida mínima de presión. El emplazamiento de los separadores es parte del diseño de la planta, y pueden estar localizados en la casa de máquinas, en puestos satélites en el campo o en las cabezas de los pozos. (GALANTE, 2007).

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 N° 2.8 Diagrama de una central de evaporación súbita o flash**



Fuente: International Geothermal Association.

### 2.6.1.3 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. (LARA, 2011).

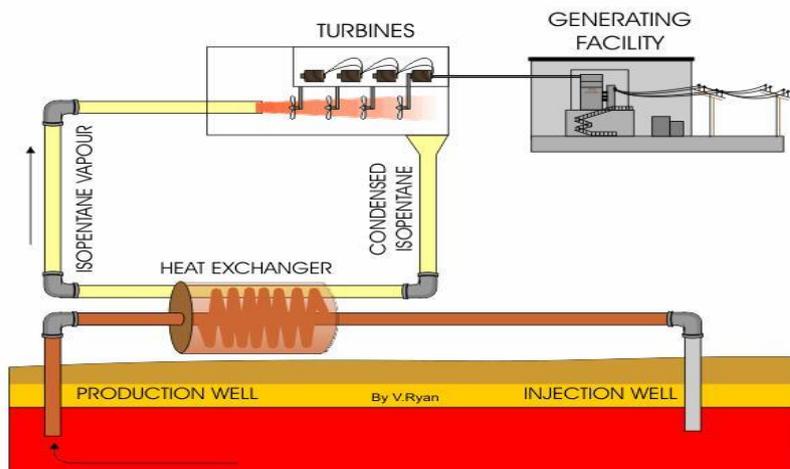
Este tipo de centrales tienen un principio termodinámico de funcionamiento similar a las centrales convencionales de combustible fósil o nuclear, en las que

el fluido de trabajo circula por un circuito cerrado. Las centrales de ciclo binario trabajan con un fluido secundario con un punto de ebullición menor al del agua y de diferentes propiedades termodinámicas. Dicho fluido de trabajo recibe calor del fluido geotérmico en un intercambiador y es vaporizado y utilizado para mover la turbina. Al salir de la turbina es condensado y reutilizado en un circuito cerrado. (GALANTE, 2007).

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 N° 2.9: Central geotérmica de ciclo binario**

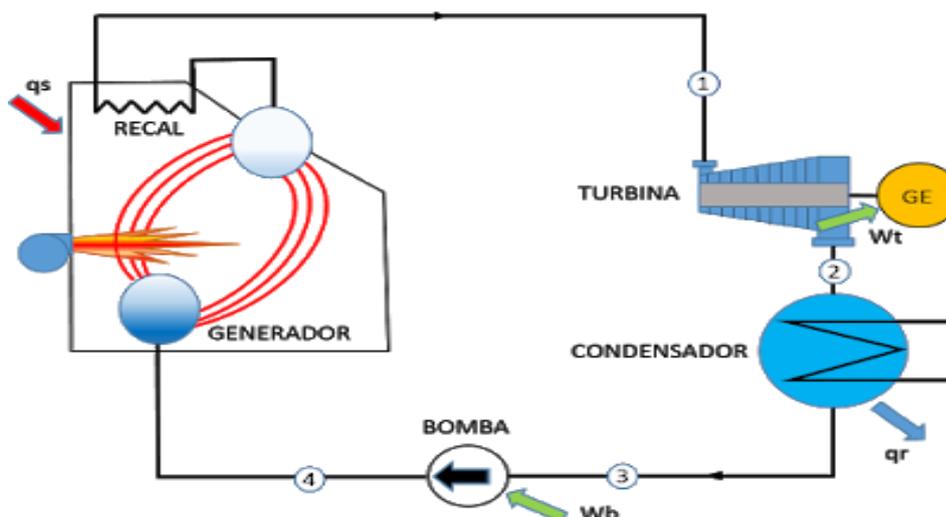


Fuente: (GALANTE, 2007).

**2.7. El ciclo de Rankine**

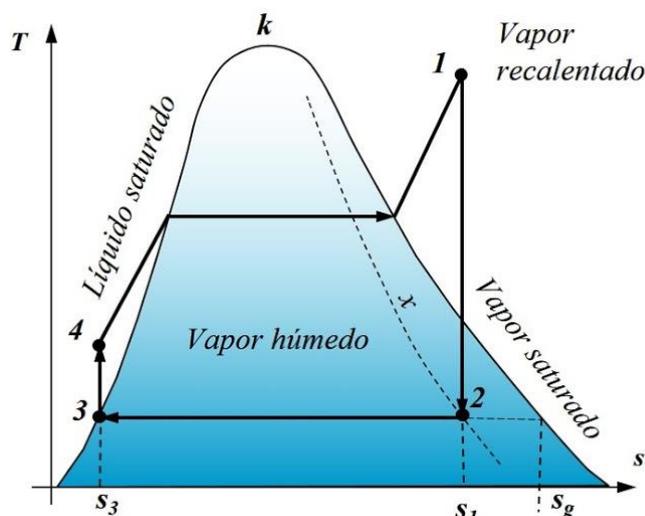
El ciclo de Rankine fue desarrollado por el físico escocés William John Macquorn Rankine (Edimburgo 1820-Glasgow 1872). Es el ciclo termodinámico que se toma como referencia para medir el rendimiento de las plantas de potencia.

**Figura N° 2.10: Ciclo básico de Rankine.**



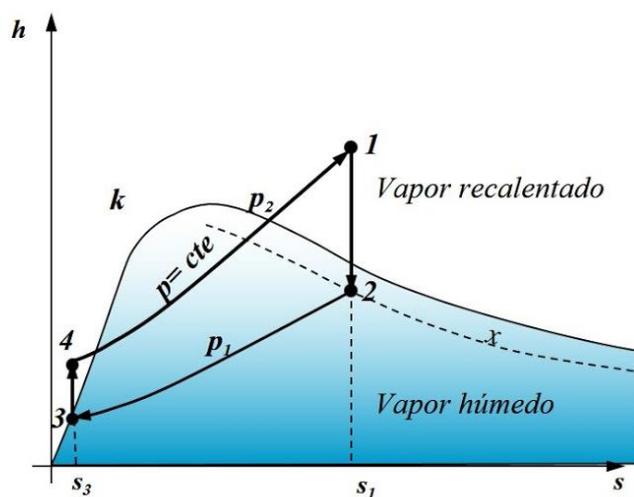
Fuente: [www.termodinamica-esimeazc.blogspot.com](http://www.termodinamica-esimeazc.blogspot.com).

Figura N° 2.11 Representación de este ciclo en el diagrama T-s



Fuente: [www.termodinamica-esimeazc.blogspot.com](http://www.termodinamica-esimeazc.blogspot.com).

Figura N° 2.12 Representación de este ciclo en el diagrama h-s



Fuente: [www.termodinamica-esimeazc.blogspot.com](http://www.termodinamica-esimeazc.blogspot.com).

### 2.7.1 Funcionamiento del ciclo de Rankine ideal.

En La utilización de los principios de conservación de masa y de energía, junto con estas idealizaciones, permite desarrollar expresiones para la energía transferida en

los equipos mostrados en la Fig. 2.10, empezando por el estado 1 y siguiendo con cada componente hasta completar el ciclo.

En la turbina el vapor generado en la caldera en el estado 1, con presión y temperatura elevadas, se expande a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el condensador en el estado 2 a baja presión. Despreciando el calor transferido al ambiente, los balances de masa y energía en términos de potencia para el volumen de control de la turbina se reducen en estado estacionario. Se tiene lo siguiente:

$$\dot{Q}_{Turb} + \dot{m}(h_1 + \frac{\vec{V}_1^2}{2} + gz_1) = \dot{W}_{turb} + \dot{m}(h_2 + \frac{\vec{V}_2^2}{2} + gz_2) \quad (2.1)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (2.2)$$

En el condensador se transfiere calor del vapor al agua de refrigeración que circula en un flujo separado. Entonces tenemos que:

$$\dot{Q}_{cond} + \dot{m}(h_2 + \frac{\vec{V}_2^2}{2} + gz_2) = \dot{W}_{cond} + \dot{m}(h_3 + \frac{\vec{V}_3^2}{2} + gz_3) \quad (2.3)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (2.4)$$

El líquido procedente del condensador en el estado 3 es bombeado desde la presión del condensador hasta la presión más alta de la caldera. Considerando un volumen de control que rodee la bomba y suponiendo que no hay transferencia de calor con el ambiente, los balances de masa y energía nos dan:

$$\dot{Q}_{bomb} + \dot{m}(h_3 + \frac{\vec{V}_3^2}{2} + gz_3) = \dot{W}_{bomb} + \dot{m}(h_4 + \frac{\vec{V}_4^2}{2} + gz_4) \quad (2.5)$$

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m}v(p_3 - p_4) \quad (2.6)$$

El fluido de trabajo completa un ciclo cuando saliendo de la bomba se calienta a vapor recalentado, desde el estado 1 al 4, es un proceso isóbaro.

$$\dot{Q}_{cald} + \dot{m}\left(h_4 + \frac{\bar{V}_4^2}{2} + gz_4\right) = \dot{W}_{cald} + \dot{m}\left(h_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1\right) \quad (2.7)$$

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.8)$$

El Rendimiento del ciclo se determina por:

$$\eta_{ciclo} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \quad (2.9)$$

### 2.7.1.1 Eficiencia del ciclo

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. 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:

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}_{cald}(h_3 - h_2) \quad (2.10)$$

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

$$q_{cald} = h_3 - h_2 \quad (2.11)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{cald} \quad (2.12)$$

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

Potencia consumida por el fluido en la bomba:

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{m}_{bomb}(h_2 - h_1) \quad (2.13)$$

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

$$w_{bomb} = h_2 - h_1 \quad (2.14)$$

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:

$$w_{bomb} = v(P_2 - P_1) \quad (2.15)$$

$$h_1 = h_{f-P_1} \quad v \cong v_1 = v_{f-P_1} \quad (2.16)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{bomb} \quad (2.17)$$

Volumen de control: *Turbina* ( $Q=0$ ):

Potencia producida por el vapor en la turbina:

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{turb}(h_3 - h_4) \quad (2.18)$$

Trabajo por unidad de masa de la turbina:

$$w_{turb} = h_3 - h_4 \quad (2.19)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{turb} \quad (2.20)$$

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

Calor cedido por unidad de tiempo:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{cond}(h_3 - h_2) \quad (2.21)$$

Calor cedido por unidad de masa:

$$q_{cond} = h_4 - h_1 \quad (2.22)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{cond} \quad (2.23)$$

Volumen de control: *Ciclo ideal completo (sin pérdidas de calor)* ( $Q_{ciclo}=W_{ciclo}$ ,

$m_e=0$ ;  $m_s=0$ ):

$$\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{bomb} = \dot{Q}_{cald} - \dot{Q}_{cond} = \dot{W}_{neto} \quad (2.24)$$

$$W_{turb} - W_{bomb} = Q_{cald} - Q_{cond} = W_{neto} \quad (2.25)$$

Conservación de la masa:

$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_{bomb} = \dot{m}_{turb} = \dot{m}_{cald} \quad (2.26)$$

Eficiencia del ciclo Rankine:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_{cald}} = \frac{W_{neto}}{Q_{cald}} = \frac{W_{turb} - W_{bomb}}{Q_{cald}} = 1 - \frac{Q_{cond}}{Q_{cald}} \quad (2.27)$$

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (2.28)$$

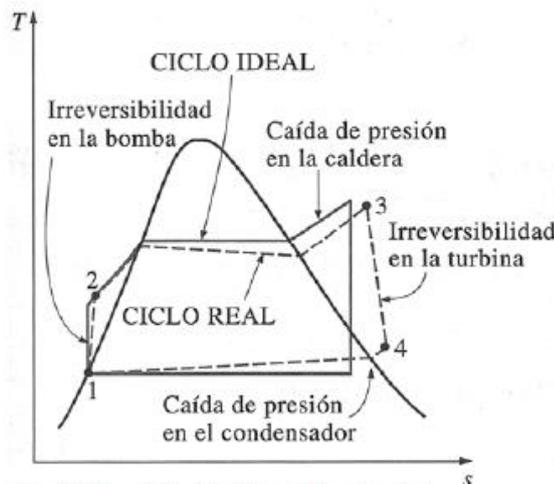
### 2.7.2 Ciclo de Rankine Real

El ciclo potencia de vapor real difiere del ciclo Rankine ideal, debido a las irreversibilidades en diversos componentes. La fricción del fluido y las pérdidas de calor indeseables hacia los alrededores son las dos fuentes más comunes de irreversibilidades. Algunas se enumeran a continuación:

- 1) Pérdidas de presión en los conductos de la caldera.
- 2) Pérdidas en el vapor sobrecalentado al pasar por los álabes de la turbina.
- 3) Enfriamiento del agua que sale del condensador.

- 4) Pérdidas durante el proceso de compresión en la bomba.
- 5) Perdidas en el proceso de combustión.
- 6) Irreversibilidades en el subsiguiente proceso de transferencia de calor al fluido que circula por los conductos de la caldera.
- 7) Perdidas de presión del fluido de trabajo al circular por las distintas tuberías.
- 8) Pedidas de calor en las tuberías de alta temperatura.
- 9) Vapor que se fuga durante el ciclo.
- 10) Aire que ingresa al condensador.
- 11) Potencia consumida por equipos auxiliares, como los ventiladores que suministran aire al horno.

**Figura N° 2.13:** Desviación del ciclo real de potencia de vapor del ciclo Rankine



Fuente: Kenneth Wark y Donald Richards, “Termodinámica”.

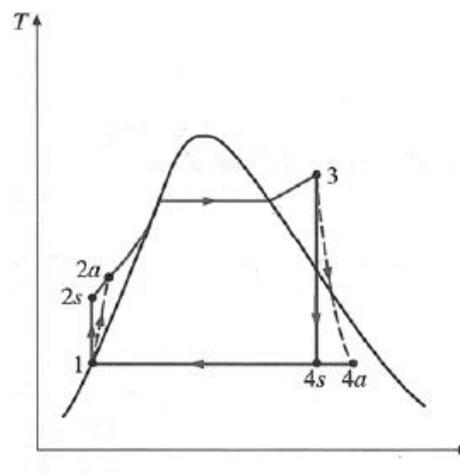
Las pérdidas que son de especial importancia son: las irreversibilidades que suceden dentro de la bomba y la turbina.

### 2.7.2.1 Pérdidas en la turbina

Las pérdidas en la turbina son:

- 1) Transferencia de calor al entorno
- 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:

**Figura N° 2.14:** Efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina.



Fuente: Kenneth Wark y Donald Richards, “Termodinámica”.

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

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

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

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{h_3 - h_{4s}} \quad (2.29)$$

Donde:

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

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

### 2.7.2.2 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.

$$\eta_{\text{bomb}} = \frac{h_{2s} - h_1}{w_{\text{bomb}}} \quad (2.30)$$

Donde:

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

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

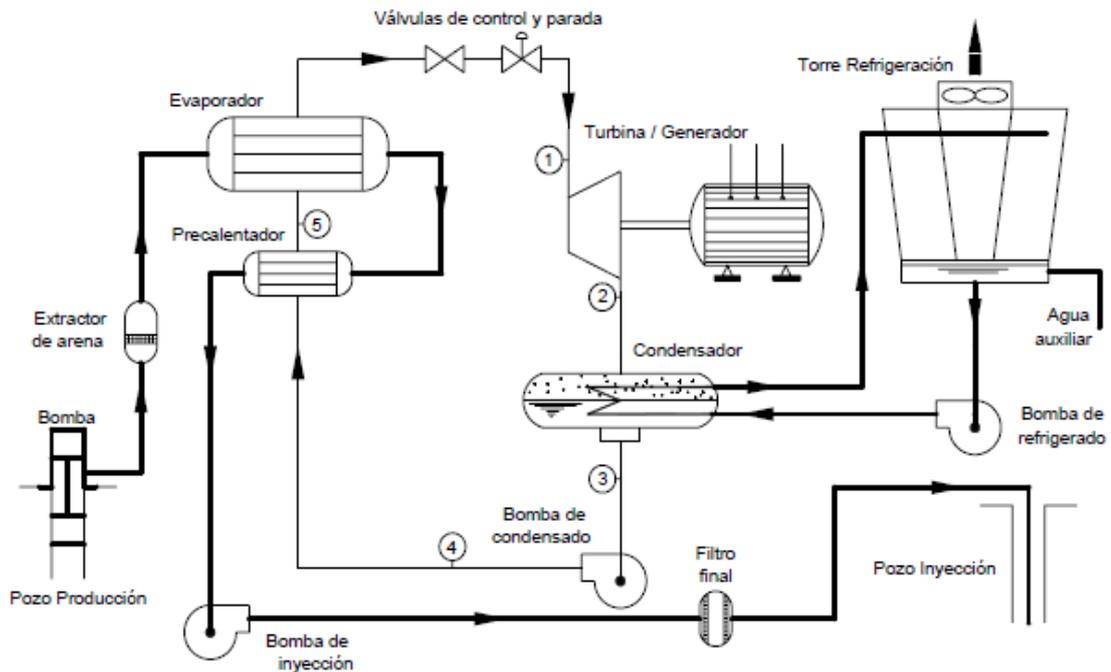
$$\rho_a = \alpha^* \frac{V}{I} \quad (31)$$

### 2.7.3 Ciclo Rankine binario

El funcionamiento de esta central geo termoeléctrica es la de un ciclo Rankine simple.

Pero en este tipo de centrales tiene como fluido de trabajo a un refrigerante que trabaja en circuito. (PINEDO MINES C. F., 2015).

**Figura N° 2.15 Esquema de una planta geotérmica de ciclo binario.**



Fuente: (GALANTE, 2007).

## 2.8. Hipótesis

### 2.8.1 Hipótesis General

Mediante la Evaluación del Potencial Geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, para la Generación de Energía Eléctrica, se podrá generar energía utilizando la fuente geotérmica.

#### 2.8.1.1 Hipótesis Específicas

- La evaluación de las características del potencial geotérmico de la Fuente Termal Puente Bello, nos permite determinar la viabilidad de la producción de energía eléctrica.
- La Selección e identificación de las características del fluido secundario de trabajo permite el aprovechamiento de energía geotérmica.

- Es posible Determinar la potencia eléctrica generada para el aprovechamiento de energía geotérmica de la fuente termal Puente Bello.

## 2.9. Variables de estudio

- **Variable Independiente**

Potencial Geotérmico

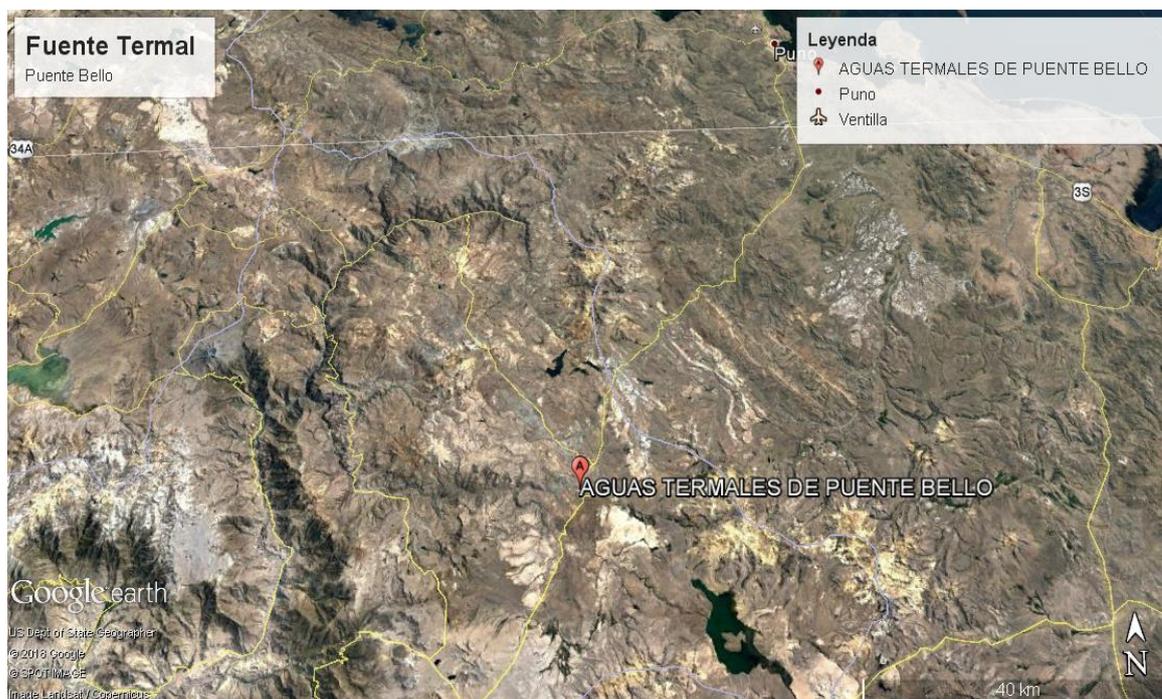
- **Variable Dependiente**

Potencial Energético

## 2.10. Localización

La ubicación del estudio Son las aguas termales que se encuentran situadas a 103 km. al oeste de la ciudad de Puno, sobre la carretera a Moquegua, en la Comunidad Campesina de Titiri, a 4,200 m.s.n.m.

**Figura N° 2.16: Ubicación de la fuente geotérmica.**



Fuente: Google earth.

## CAPITULO III

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1 Método de la 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 Batista en Metodología de la Investigación. (SIAMPERI, 2014).

De acuerdo a lo mencionado la presente investigación se enmarca dentro la investigación cuantitativa, Descriptiva Correlacional.

##### 3.1.2 Tipo de investigación

Dentro de los enfoques de investigación podemos distinguir los siguientes:

- **El enfoque cualitativo:** Es un enfoque subjetivo basado en la literatura y las experiencias iniciales, está orientado hacia la exploración, la descripción y el entendimiento marca el énfasis no en medir las variables involucradas en un proceso, sino en entenderlo como un todo en su ambiente usual, usa recolección de datos sin medición numérica para descubrir o afinar preguntas de investigación y puede o no probar hipótesis en su proceso de interpretación. Las entrevistas abiertas y la observación no estructurada son ejemplos asociados al enfoque cualitativo.
- **El enfoque cuantitativo:** Es un enfoque objetivo, es un conjunto de procesos secuenciales y probatorios cada etapa precede a la siguiente y no podemos brincar los pasos, parte de una idea de la cual se derivan objetivos y preguntas

de investigación se revisa la literatura y se construye un marco teórico, de las preguntas se establecen variables y determinan variables, se desarrolla un plan para probarlas (diseño), se miden las variables en un determinado contexto se analizan las mediciones obtenidas (con frecuencia utilizando métodos estadísticos), se establecen una serie de conclusiones respecto de las hipótesis.

- **Estudios exploratorios:** Se realizan cuando el objetivo consiste en examinar un tema poco estudiado del cual se tienen muchas dudas o no se ha estudiado antes. Sirven para preparar el terreno y anteceden a investigaciones con alcance descriptivo, correlacionales o explicativas.
- **Estudios descriptivos** busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población. Es decir, únicamente pretende medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre las variables, sin indicar como se relacionan estas.
- **Los estudios correlacionales:** Asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población. Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular. Tienen el riesgo de correlación espuria o falsa, cuando dos variables están aparentemente relacionadas, pero en realidad no es así
- **Los Estudios explicativos:** Pretende establecer la causa de los eventos, sucesos o fenómenos que se estudian. Están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Su interés se centra en explicar porque ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta. (Sampieri, 2014).

De acuerdo a lo mencionado la presente investigación se enmarca dentro la investigación cuantitativa, Descriptiva Correlacional.

El presente proyecto, es una investigación de tipo descriptiva correlacional por que relaciona más de una variable, 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).

### **3.1.3 Técnicas de recolección de datos**

Son los documentos soporte para registrar la información recolectada. Dependiendo de la técnica empleada su 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. (Chávez, 2004)

Para la recolección de información se utilizarán las técnicas:

- ✓ Observaciones directas.
- ✓ Mediciones de datos.

### **3.1.4 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.

### 3.1.5 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)

### 3.1.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para poder lograr los objetivos planteados se llegan a elegir las siguientes técnicas e instrumentos:

**Tabla N° 3.3: Técnicas e Instrumentos**

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Medición - Permite identificar y evaluar datos reales	Termómetro: Medida de la Temperatura de la fuente Geotermal

Elaborado por el equipo de trabajo.

## 3.2 Características del potencial Geotérmico

Para el cumplimiento del presente objetivo es necesario realizar el registro de la temperatura de la fuente termal de la Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, Para identificar la temperatura de Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, se realiza a través de la toma de datos con el termómetro directamente.

Se midió la temperatura de las aguas termales de Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno. Para realizar esto se utilizaron termómetros de lectura directa.

La Fuente Termal Puente Bello Titire, distrito de Pichacani Puno, está ubicada Departamento de Puno en las coordenadas: 367880 Coordenada Este, 8194814 Coordenada Sur. Cuadrante 19L. Los resultados de la investigación serán registrados en el cuadro que se refiere a continuación.

**Tabla N° 3.4: Formato de Registro**

REGISTRO DE TEMPERATURA PUENTE BELLO				
Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.3 Selección de las características del fluido secundario

La selección de las características del fluido de secundario de trabajo se basa en las características de las sustancias, Se deben tener en cuenta las propiedades termodinámicas de los fluidos, así como otras consideraciones de seguridad, salud e impacto ambiental.

En la siguiente tabla se muestra algunas sustancias típicas usadas como fluidos de trabajo y sus propiedades termodinámicas relevantes. Estas sustancias, tienen temperaturas críticas y presiones mucho menores que las del agua.

Tabla N° 3.5: Sustancias Típicas

Fluido	Fórmula	TC (° C)	PC (MPa)
Propano	$C_3H_8$	96.95	4.236
i-Butano	$i-C_4H_{10}$	135.92	3.685
n-Butano	$C_4H_{10}$	150.8	3.718
i-Pentano	$i-C_5H_{12}$	187.8	3.409
n-Pentano	$C_5H_{12}$	193.9	3.24
Amoníaco	$NH_3$	133.65	11.627
Agua	$H_2O$	374.14	22.089

Elaborado por el equipo de trabajo.

### 3.4 Cálculo de la potencia de Generación eléctrica

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 entalpía y entropía a una temperatura inicial y presión inicial: (PINEDO MINES C. F., 2015)

$$h_1 = h(p_1, T_1) \text{ KJ/Kg} \quad (3.32)$$

$$S_1 = S(p_1, T_1) \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{K} \quad (3.33)$$

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.

$$h_2 = h(p_2, S_2) \text{ KJ/Kg} \quad (3.34)$$

$$S_2 = S_1 \quad (3.35)$$

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

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{W_{\text{turb}}}{h_3 - h_{4s}} \quad (3.36)$$

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_2} \quad (3.37)$$

$$h_{2r} = h_1 - \eta_{\text{TV}} (h_1 - h_2) \text{ KJ/Kg} \quad (3.38)$$

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

$$h_3 = h(P_2, \text{liquido sat.}) \text{ KJ/Kg} \quad (3.39)$$

$$v_3 = v(p_2) \text{ m}^3/\text{Kg} \quad (3.40)$$

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

$$h_4 = h_3 + v_3(P_4 - P_3) \text{ KJ/Kg} \quad (3.41)$$

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

$$\eta_{\text{BOMBA}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4r}} \quad (3.42)$$

$$h_{4r} = \frac{h_3 - h_4}{\eta_{\text{BOMBA}}} + h_3 \quad (3.43)$$

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 la fase 2 a baja presión.

$$\dot{W}_T / \dot{m} = \dot{m}(h_1 - h_{2s}) \quad (3.44)$$

$$\dot{P}_T = \dot{m}(h_1 - h_{2r}) \quad (3.45)$$

Determinamos el  $h_2$  real:

$$\eta_{\text{TURBINA}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (3.46)$$

$$h_2 = h_1 - \eta_T(h_1 - h_{2r}) \text{ KJ/Kg} \quad (3.47)$$

Donde:

$m$  : Flujo másico del fluido de trabajo

$W/m$  : Trabajo desarrollado en la turbina en KJ/Kg

$P_T$  : Potencia generada por la turbina en KJ/Kg

En el condensador se inicia en la fase 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.

$$\dot{Q}_c / \dot{m} = (h_2 - h_3) \quad (3.48)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (3.49)$$

**Donde**

$Q_c/m$  : 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.

$$W_B / \dot{m} = (h_{4s} - h_3) \quad (3.50)$$

$$P_B = \dot{m} \sec^* (h_{4r} - h_3) \quad (3.51)$$

Determinamos el  $h_2$  real.

$$\eta_{\text{BOMBA}} = \frac{h_{4S} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (3.52)$$

$$h_4 = \frac{h_{4S} - h_3}{\eta_{\text{BOMBA}}} + h_3 \quad (3.53)$$

*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.

$$\dot{Q}_{\text{InterCalor}}/\dot{m} = (h_1 - h_4) \quad (3.54)$$

$$P_{\text{InterCalor}} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3.55)$$

*Donde*

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

$P_{\text{InterCalor}}$  : 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.

$$P_{neta} = P_{Turbina} - P_{Bomba} \text{ KJ/Kg} \quad (3.56)$$

Donde:

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

La potencia neta generada la determinamos con la siguiente ecuación:

$$P_{NetaGenerada} = P_{Neta} \cdot \eta_{Mecanica} \cdot \eta_{Generación} \quad (3.57)$$

**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:

$$\eta_{Planta} = \frac{P_{Generada}}{P_{Sumnistrada}} \quad (3.58)$$

$$\eta_{Planta} = \frac{P_{Turvina}}{Q_{InterCalor}} \quad (3.59)$$

$$\eta_{Planta} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} \quad (3.60)$$

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

$$\dot{m}_{FluidoGeotrm} \cdot (h_a - h_c) = \dot{m}_{FluidoSecnd} \cdot (h_1 - h_4) \quad (3.61)$$

$$\dot{m}_{\text{FluidoGeotrm}} C_{p\text{FluidoGeotrm}} (T_a - T_c) = \dot{m}_{\text{FluidoSecnd}} (T_1 - T_4) \quad (3.62)$$

*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.

$T_e$  : Temperatura de salida del fluido geotermal del intercambiador °C.

(PINEDO MINES C. F., 2015)

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo 4 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 Puente Bello Titire Puno.

#### 4.1 Temperatura de las aguas termales de Puente Bello

La fuente termal de Puente Bello se ubica en la margen derecha de la carretera interoceánica con dirección a Moquegua, distrito de Pichacani, provincia y Región de Puno. La fuente termal registra una temperatura mínima de 82.4°C, una temperatura máxima de 91.5°C. Estas mediciones fueron realizadas en los meses de febrero Marzo y Abril del 2019, considerando que es un mes frío.

**Tabla N° 4.6: Temperatura Fuente Termal Puente Bello.**

T °C	
Minimo	82.4
Maximo	91.5
Promedio	86.27

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Tabla N° 4.7 Ubicación Fuente Termal Puente Bello.**

Coordenadas		Altitud (msnm)
Norte	8169984.12	4,200
Este	352635.54	

Elaborado por el equipo de trabajo.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla N° 4.8: Temperatura Fuente Termal Puente Bello Febrero**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Puente Bello	20 de febrero de 2019	91.5	91.5	83.5	87.5
		89.1			
		89.8			
		89.1			
		88.1			
		87.7			
		86.3			
		85.8			
		84.1			
		83.5			

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Tabla N° 4.9 Temperatura Fuente Termal Puente Bello Marzo**

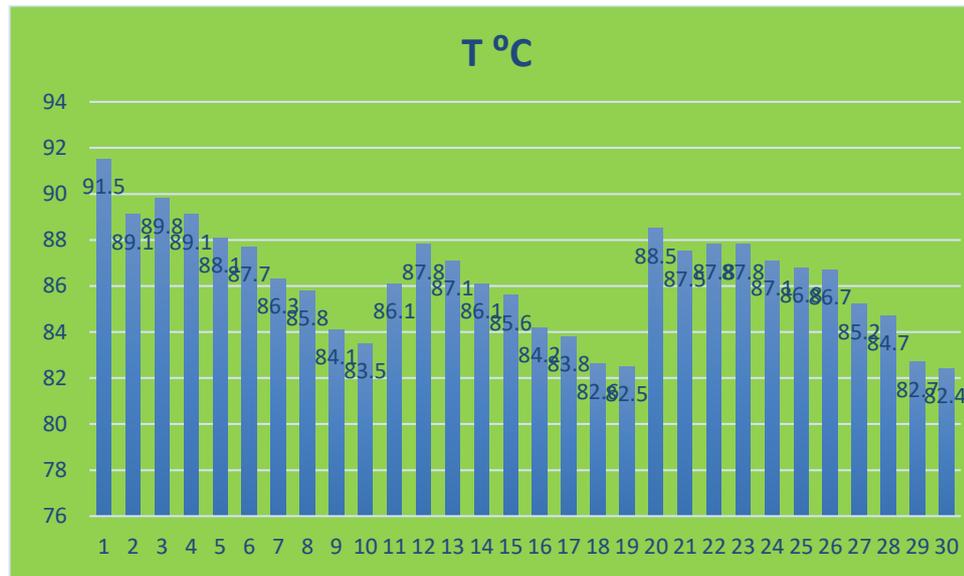
REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Puente Bello	15 de marzo de 2019	86.1	88.5	82.5	85.43
		87.8			
		87.1			
		86.1			
		85.6			
		84.2			
		83.8			
		82.6			
		82.5			
		88.5			

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Tabla N° 4.10: Temperatura Fuente Termal Puente Bello Abril**

REGISTRO DE TEMPERATURA					
Lugar de muestra	Fecha	T °C	T °C max	T °C min	T °C Prom.
Puente Bello	17 de abril de 2019	87.5	87.8	82.4	85.87
		87.8			
		87.8			
		87.1			
		86.8			
		86.7			
		85.2			
		84.7			
		82.7			
		82.4			

Elaborado por el equipo de trabajo.

**Figura N° 4.17: Valores de temperatura**

Elaborado por el equipo de trabajo.

#### 4.2 Selección de las características del fluido secundario

Para la selección del fluido de trabajo debemos tener en cuenta las propiedades termodinámicas de los fluidos, así como otras consideraciones de seguridad, salud e impacto ambiental.

Otra característica importante de los fluidos de trabajo candidatos es la forma de la curva de vapor saturado. Dicha curva para el agua tiene una curva negativa en todo momento. Sin embargo, algunos hidrocarburos y refrigerantes presentan una pendiente positiva en algunos tramos de la curva de saturación. Este retroceso en la curva hace que pueda no ser necesario sobrecalentar el fluido de trabajo para tener vapor sobrecalentado después de la expansión en la turbina.

También hay que considerar las propiedades medioambientales, de salud y seguridad de los potenciales fluidos de trabajo, a la hora de escoger el más apropiado para una

planta de ciclo binario. Estas propiedades incluyen inflamabilidad, toxicidad, potencial de destrucción de ozono (ODP) y potencial de calentamiento global (GWP).

En la comparación también se incluyen dos clorofluorocarbonos, el R-12 y el R-114, que eran usados hace algunos años. Sin embargo, debido a sus elevados ODP y GWP, ambos han sido prohibidos. Todos los hidrocarburos candidatos a ser utilizados como fluidos de trabajo son obviamente inflamables, y necesitan la instalación de equipos adecuados de protección contra incendios. (GALANTE, 2007)

**Tabla N° 4.11:** Propiedades termodinámicas de fluidos de trabajo

Fluido	Fórmula	TC (° C)	PC (MPa)	PC a 300K (MPa)	Ps a 400K (MPa)
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	97.0	4.236	0.994	-
i-Butano	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	135.9	3.685	0.373	3.204
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	150.8	3.718	0.256	2.488
i-Pentano	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	187.8	3.409	0.098	1.238
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	193.9	3.24	0.074	1.036
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	133.7	11.627	1.061	10.300
Agua	H <sub>2</sub> O	374.1	22.089	0.004	0.246

Fuente: (GALANTE, 2007)

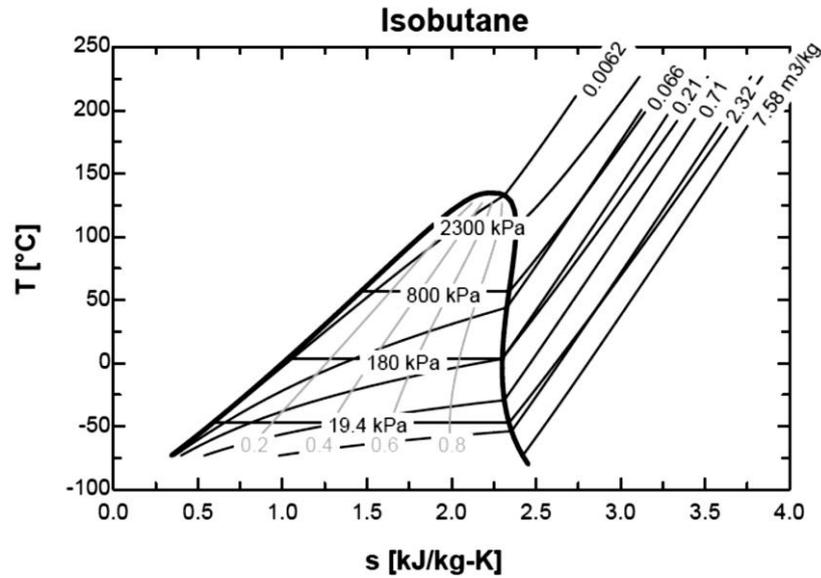
**Tabla N° 4.12:** Propiedades medioambientales, seguridad y salud

Fluido	Fórmula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
R-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	No tóxico	No inflamable	1	4500
R-114	C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	No tóxico	No inflamable	0.7	5850
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Baja	Muy alta	0	3
i-Butano	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Baja	Muy alta	0	3
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Baja	Muy alta	0	3
i-Pentano	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Baja	Muy alta	0	3
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Baja	Muy alta	0	3
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	Tóxico	Baja	0	3
Agua	H <sub>2</sub> O	No tóxico	No inflamable	0	-

Fuente: (GALANTE, 2007)

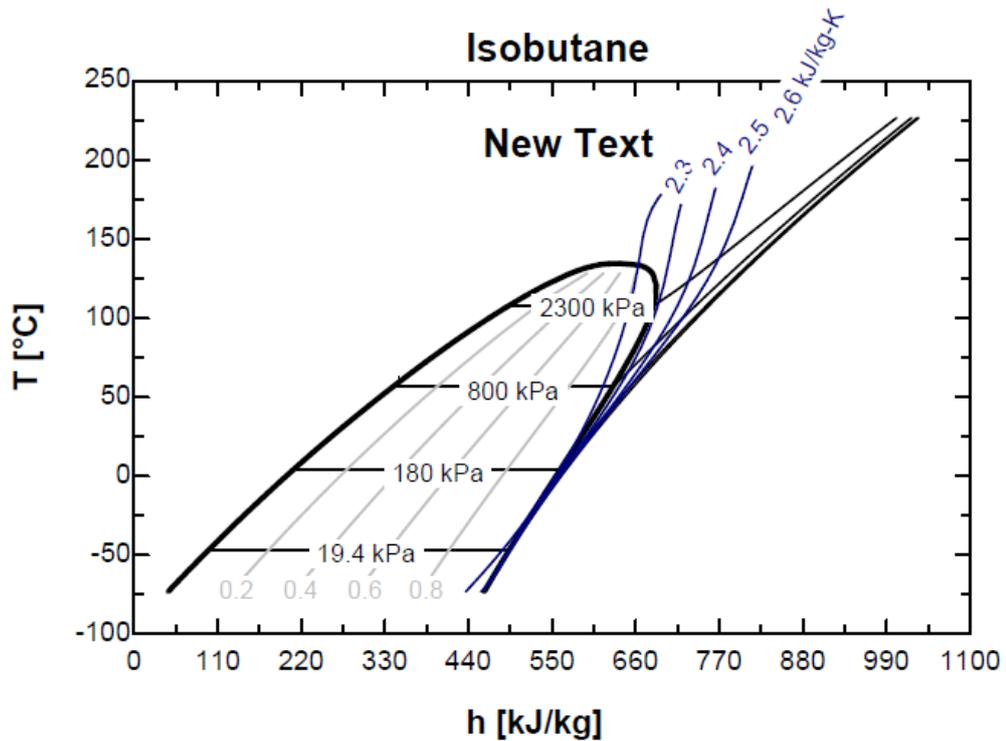
Teniendo en cuenta las recomendaciones seleccionaremos como fluido de trabajo el Isobutano ( $i-C_4H_{10}$ ).

**Figura N° 4.18: Diagrama T-S Isobutano**



Fuente: EES

**Figura N° 4.19 Diagrama T-h Isobutano**



Fuente: EES

### 4.3 Calculo de la potencia de Generación eléctrica

Basándonos en la segunda ley de la termodinámica y aplicando el ciclo Rankine simple, utilizando como sustancia de trabajo el Isobutano aplicaremos en cada uno de los componentes del ciclo binario básico.

Para la generación de energía considerando un ciclo binario, y con los datos tomados en campo podemos tomar como datos de geotermia temperaturas del fluido geotermal entre 80 y 100 °C, a la entrada del intercambiador de calor este puede variar de acuerdo a la profundidad que se encuentra el fluido de trabajo.

Con un flujo de trabajo de 5 Kg/s, y el fluido secundario a la temperatura de 90 °C.

Consideramos el calor específico del fluido geotermal en 4.217 KJ/Kg °C y del fluido secundario 1.79 KJ/Kg °C

Calculamos la entalpia y entropía a una temperatura inicial de 86°C y presión inicial 10 bares, utilizando el isobutano como sustancia secundaria en base a los cálculos obtenidos con el programa EES Comercial se tiene:

Datos de inicio:

- Eficiencia de la turbina: 88% (Catalogo fabricante)
- Eficiencia de la Bomba: 80% (Catalogo fabricante)
- Temperatura Fuente Geotermal 1: 100
- Temperatura Fuente Geotermal 2: 86
- Flujo másico de la fuente termal: 300 L/min. = 5 Kg/s (Según INGEMET)

**Tabla N° 4.13: Parámetros Fuente termal Puente Bello**

Fuente	Fecha	pH	CE (µS/cm)	Proporción de flujo (L/min.)
Puente Bello	04/07/2010	6.97	16 770	300

Fuente: INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 58

**FASE 01:**

De las propiedades termodinámicas del isobutano obtenemos la entalpía y entropía a temperatura inicial de 90 °C y presión inicial de 10 Bar.

$$h_1 = h(p_1, T_1) = 716.1 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_1 = S(p_1, T_1) = 2.559 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{K}$$

**FASE 02:**

Puesto que el proceso es isoentrópico y aplicando la segunda ley de la termodinámica hallamos la entalpía 2 ( $h_2$ ), considerando la entropía 2 igual a la entropía 1 ( $S_2=S_1$ ) y una presión de expansión de 0.65.

$$h_{2s} = h(p_2, S_2) = 594.0 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_2 = S_1 = 2.559 \text{ KJ/Kg} - \text{K}$$

Con lo que se determina el valor de la entalpía  $h_2$  que es irreversible. Considerando la eficiencia de la turbina 88% de acuerdo a especificaciones técnicas de los fabricantes:

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

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

$$h_{2r} = h_1 - \eta_{TV} (h_1 - h_2) = 608.7 \text{ KJ/Kg}$$

**FASE 03:**

Determinamos la entalpía  $h_3$  de propiedades del fluido Isobutano en estado líquido saturado, y la densidad por la cual obtendremos el volumen específico.

$$h_3 = h(P_2, \text{liquido sat.}) = 149.7 \text{ KJ/Kg}$$

$$v_3 = v(p_2) = 0.001651 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

**FASE 04:**

Determinamos la entalpía  $h_4$  mediante la siguiente ecuación considerando que  $P_4=P_1=10 \text{ bar}$  y  $P_3=P_2=0.65 \text{ bar}$ .

$$h_4 = h_3 + v_3 (P_4 - P_3) \times 100 = 151.2 \text{ KJ/Kg}$$

Determinamos el estado real de la entalpía  $h_{4r}$  considerando la eficiencia de bomba igual a 0.8.

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

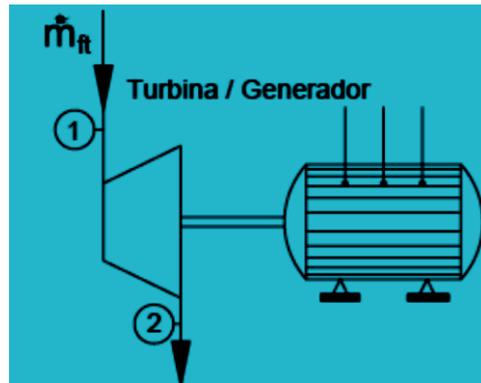
$$h_{4r} = \frac{h_3 - h_4}{\eta_{\text{BOMBA}}} + h_3 = 151.6 \text{ Kj / Kg.}$$

Procedemos al cálculo en los componentes del ciclo Rankine:

**Turbina**

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

**Figura N° 4.20: Turbina y generador del ciclo binario**



$$\dot{W}_T = (h_1 - h_{2r}) = (716.1 - 608.7) = 107.4Kj / Kg$$

Determinamos la Potencia de la bomba usando el caudal del fluido secundario 5 Kg/s y los datos obtenidos.

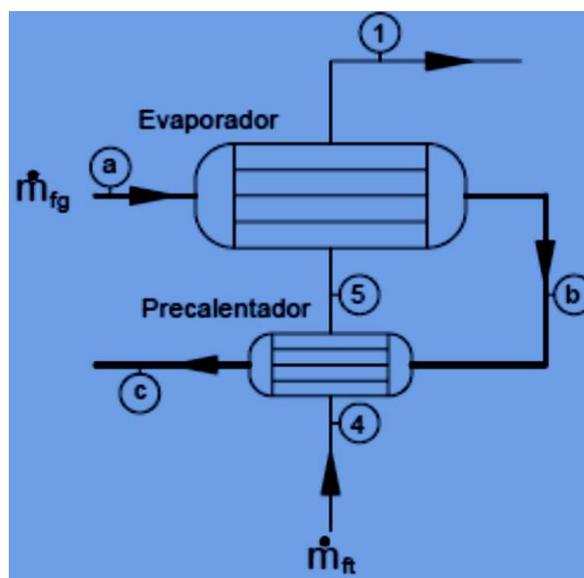
**Figura N° 4.21: Bomba de condensado**



$$\dot{W}_B = (h_{4r} - h_3) = (151.6 - 149.7) = 1.9Kj / Kg$$

Determinamos el flujo másico del gas secundario según balance de energía con los datos obtenidos para al isobutano en el intercambiador de calor.

Figura N° 4.22: Pre calentador y evaporador



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

$$\dot{m}_{fs} = \frac{\dot{m}_{fg} C_{p_{fg}} (T_a - T_b)}{C_{p_{fs}} (T_1 - T_4)} = 1.925 \text{ Kg/s}$$

Determinamos la Potencia de la turbina.

$$P_{Turbina} = \dot{m}_{fs} (h_1 - h_{2r}) = 206.8 \text{ Kj/s}$$

$$P_{Turbina} = 206.8 \text{ KW}$$

La potencia en la bomba.

$$P_B = \dot{m}_{sec} (h_{4r} - h_3) = 2.97 \text{ Kj/s}$$

$$P_B = 2.97 \text{ KW}$$

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.

$$P_{neta} = P_{Turbina} - P_{Bomba} = 203.8 \text{ KJ/s}$$

$$P_{neta} = 203.8 \text{ KW}$$

La potencia neta generada la determinamos con la siguiente ecuación:

$$P_{NetaGenerada} = P_{Neta} \cdot \eta_{Mecanica} \cdot \eta_{Generación} = 170.2 \text{ KJ/s}$$

$$P_{NetaGenerada} = 170.2 \text{ KW}$$

El rendimiento térmico está dado por:

$$\eta_{Planta} = \frac{P_{Generada}}{P_{Sumnistrada}}$$

$$\eta_{Planta} = \frac{P_{Turvina}}{Q_{InterCalor}}$$

$$\eta_{Planta} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} = 0.1902 = 19.02\%$$

## CONCLUSIONES

- La fuente geotérmica de Puente Bello Titire Puno, presenta un yacimiento hidrotermal con temperaturas entre 82.4 y 91 °C medidas en la superficie, estas son mayores bajo la corteza terrestre con un flujo másico de 300 l/min es decir 5 kg/s. Según, mediciones realizadas en el proceso de investigación de la presente tesis.
- Después del análisis detallado presentado se eligió como fluido secundario de trabajo al Isobutano; por tener características óptimas de trabajo como son, baja temperatura de ebullición y condensación superior a 0°C. No es corrosivo ni contaminante; razones por la cual es uno de los refrigerantes más usados en centrales de ciclo binario.
- Para la determinación de la cantidad de energía que se puede generar se realizó 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 binario y con la aplicación del software el programa EES Comercial versión 6.883 se tiene como resultado el siguiente: la potencia eléctrica calculada según las características del fluido geotermal es de 170.2 KW con una eficiencia de planta de 19.2%.

## RECOMENDACIONES

- Para complementar el estudio se debe realizar el análisis de viabilidad económica con parámetros como inversiones, flujo de caja y rentabilidad, que ayudara a tomar decisiones para su posible construcción del proyecto geotérmico para la producción de electricidad.
- En nuestra región tenemos numerosas fuentes geotermales que podrían dotar de energía limpia y renovable las cuales se debe aprovechar no solo para la generación de electricidad sino para sus distintas formas de uso.
- Promover la investigación referente al estudio de la producción de energía utilizando el potencial geotérmico de la región Puno.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amaguaya, E. S. (2009). *DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA*. Riobamba Ecuador: ESPC.
- Bona, P., & Coviello, M. F. (2016). *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur*. Naciones Unidas : CEPAL.
- Dickson, M. y. (2004). *What is Geothermal Energy?* Pisa Italia: Instituto de Geociencia y Recursos Geológicos.
- ESMAP. (2012). *MANUAL DE GEOTÉRMIA: COMO PLANIFICAR Y FINANCIAR LA GENERACIÓN DE ELÉCRICIDAD*. Washintong D.C. EE.UU.: ESMAP.
- EXPÓSITO, M. M. (2015). *Análisis de la Energía Geotérmica de Baja Temperatura en Terrenos Volcánicos. Aplicaciones a la Construcción en Tenerife*. Alicante: UA.
- GALANTE, A. M. (2007). *ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN LATINOAMÉRICA*. MADRID: UPC.
- 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 Chile: UBB.
- HERRERA, J. Y., & JERI, J. D. (2017). *PROSPECCIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS EN LA REGIÓN CUSCO Y SU APLICACIÓN EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. CUSCO: UNSAC.

LARA, A. L. (2011). *PROYECTO DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA*. Quito, Ecuador: EPN.

PINEDO MINES, C. F. (2015). *ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA SU APROVECHAMIENTO MEDIANTE UNA CENTRAL DE CICLO BINARIO PARA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN LA REGIÓN CORONGO-ANCASH, PERÚ*. NUEVO CHIMBOTE: UNS.

Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mexico, D.F.: McGRAW-HILL.

Santilli, F. A. (2014). *Energía Geotérmica de Baja Entalpía: Comprobación de presencia y análisis conceptual de aprovechamiento*. Mendoza Argentina : UNC.

SIAMPERI, R. (2014). *Metodología de la Investigación* . 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 01 - REGISTRO DE FOTOGRAFIAS

Fuente termal Puente Bello



Foto N° 01 | *Ubicación del punto de medición para las temperaturas C°.*



Foto N° 02 | *Realizando las mediciones temperaturas C° a nivel de superficie.*



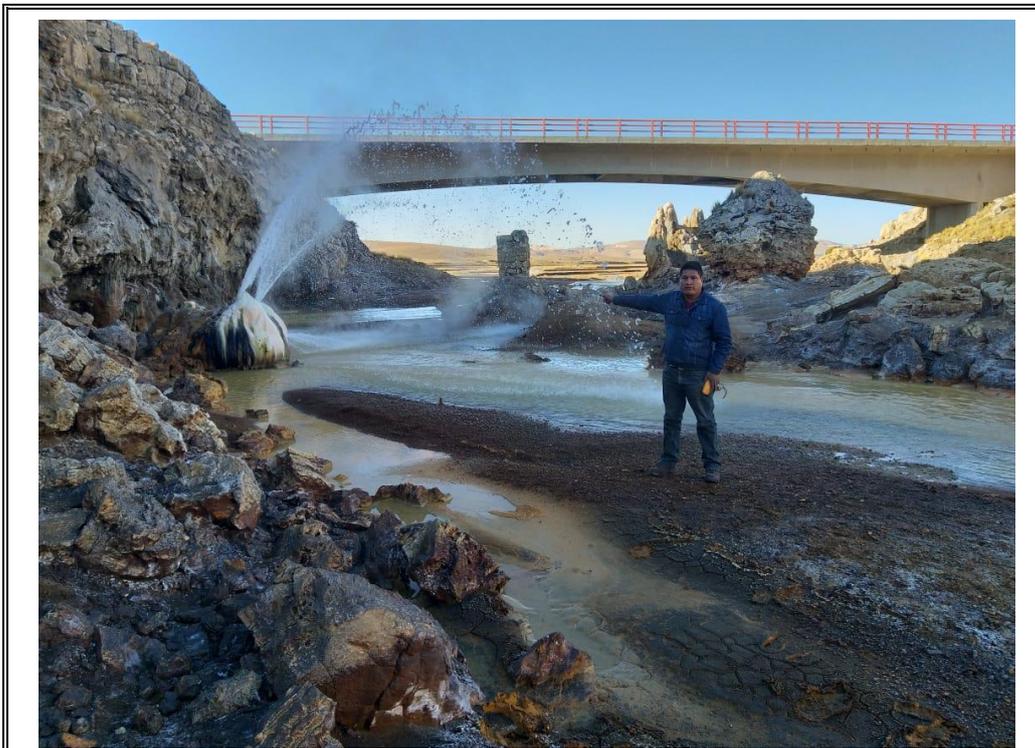
**Foto N° 03** *Realizando las mediciones temperaturas C° a nivel de superficie.*



**Foto N° 04** *Realizando las mediciones temperaturas C° a nivel de superficie*



**Foto N° 05** *Realizando las mediciones temperaturas C° a nivel de superficie*



**Foto N° 06** *Realizando las mediciones temperaturas C° a nivel de superficie*



**Foto N° 07** *Culminación total de las mediciones de las temperaturas C° en un proceso continuo.*



**Foto N°08** *Realizando las mediciones temperaturas a nivel de superficie con el instrumento de termómetro digital tiene un rango de( -50°C hasta 1000°C).*

ANEXO-02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883  
EES Ver. 6.883: #434: For use only by Kwangil Kim of Samsung Electronics Co.

```

$UnitSystem SI bar C
*PUENTE BELLO*
**
*Datos*

Ntv=0.88
Nb=0.8
m_geo=5
T1_geo=100
T2_geo=80
C_geo=4.217
C=1.794
m_gas=(m_geo*C_geo*(T1_geo-T2_geo))/(C*(T[1]-T[4]))
Ngen=0.96
Ntm=0.87

*FASE 1*

P[1]=10[BAR]
T[1]=100[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])

*FASE 2*

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])

*FASE 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])

*FASE 4*

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
    
```

14/07/2019 09:18:10 p.m.

Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883

P\_neta=Ptv-P\_bomba  
Ptv=m\_gas\*(H[1]-Hr[2])  
Pgen=P\_neta\*Ntm\*Ngen

PUENTE BELLO

Datos

Ntv = 0.88

Nb = 0.8

m\_gas = 5

T1\_gas = 100

T2\_gas = 80

C\_gas = 4.217

C = 1.794

$$m_{\text{gas}} = \frac{m_{\text{gas}} \cdot C_{\text{gas}} \cdot [T1_{\text{gas}} - T2_{\text{gas}}]}{C \cdot [T_1 - T_4]}$$

Ngen = 0.96

Ntm = 0.87

FASE 1

P<sub>1</sub> = 10 [BAR]

T<sub>1</sub> = 100 [C]

H<sub>1</sub> = h ['Isobutane', T=T<sub>1</sub>, P=P<sub>1</sub>]

S<sub>1</sub> = s ['Isobutane', T=T<sub>1</sub>, P=P<sub>1</sub>]

Tsat<sub>1</sub> = T<sub>sat</sub> ['Isobutane', P=P<sub>1</sub>]

FASE 2

S<sub>2</sub> = S<sub>1</sub>

P<sub>2</sub> = 0.65 [BAR]

H<sub>2</sub> = h ['Isobutane', s=S<sub>2</sub>, P=P<sub>2</sub>]

Hr<sub>2</sub> = H<sub>1</sub> - Ntv · [H<sub>1</sub> - H<sub>2</sub>]

T<sub>2</sub> = T ['Isobutane', h=H<sub>2</sub>, P=P<sub>2</sub>]

14/07/2019 09:18:10 p.m.

Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883

$$Sr_2 = s \text{ [ 'Isobutane' , h = Hr}_2 \text{ , P = P}_2 \text{ ]}$$

$$Tr_2 = T \text{ [ 'Isobutane' , h = Hr}_2 \text{ , P = P}_2 \text{ ]}$$

FASE 3

$$P_3 = P_2$$

$$X_3 = 0$$

$$H_3 = h \text{ [ 'Isobutane' , P = P}_2 \text{ , x = X}_3 \text{ ]}$$

$$S_3 = s \text{ [ 'Isobutane' , P = P}_2 \text{ , x = X}_3 \text{ ]}$$

$$T_3 = T_{sat} \text{ [ 'Isobutane' , P = P}_2 \text{ ]}$$

$$N_{planta} = \frac{H_1 - Hr_2}{H_1 - H_4}$$

FASE 4

$$V_3 = v \text{ [ 'Isobutane' , P = P}_3 \text{ , x = X}_3 \text{ ]}$$

$$T_4 = T \text{ [ 'Isobutane' , h = H}_4 \text{ , P = P}_4 \text{ ]}$$

$$H_4 = H_3 + V_3 \cdot [P_1 - P_2] \cdot 100$$

$$P_4 = P_1$$

$$S_4 = s \text{ [ 'Isobutane' , T = T}_4 \text{ , P = P}_4 \text{ ]}$$

$$Sr_4 = s \text{ [ 'Isobutane' , h = Hr}_4 \text{ , P = P}_4 \text{ ]}$$

$$Tr_4 = T \text{ [ 'Isobutane' , h = Hr}_4 \text{ , P = P}_4 \text{ ]}$$

$$Hr_4 = H_3 - \left[ \frac{H_3 - H_4}{Nb} \right]$$

$$W_{sv} = H_1 - Hr_2$$

$$P_{bomba} = [H_4 - H_3] \cdot m_{gas}$$

$$P_{neta} = P_{tv} - P_{bomba}$$

$$P_{tv} = m_{gas} \cdot [H_1 - Hr_2]$$

$$P_{gen} = P_{neta} \cdot N_{tm} \cdot N_{gen}$$

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

C = 1.794

C<sub>geo</sub> = 4.217

H<sub>1</sub> = 716.1 [kJ/kg]

H<sub>2</sub> = 594 [kJ/kg]

14/07/2019 09:18:10 p.m.

Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883

$H_3 = 149.7$  [kJ/kg]  
 $H_4 = 151.2$  [kJ/kg]  
 $Hr_2 = 608.7$   
 $Hr_4 = 151.6$   
 $m_{gas} = 1.925$   
 $m_{geo} = 5$   
 $Nb = 0.8$   
 $Ngen = 0.96$   
 $Ntm = 0.87$   
 $Ntv = 0.88$   
 $N_{planta} = 0.1902$   
 $Pgen = 170.2$   
 $Ptv = 206.8$   
 $P_1 = 10$  [BAR]  
 $P_2 = 0.65$  [BAR]  
 $P_3 = 0.65$  [BAR]  
 $P_4 = 10$  [BAR]  
 $P_{bomba} = 2.97$   
 $P_{neta} = 203.8$   
 $S_1 = 2.559$  [kJ/kg-K]  
 $S_2 = 2.559$  [kJ/kg-K]  
 $S_3 = 0.8083$  [kJ/kg-K]  
 $S_4 = 0.8083$  [kJ/kg-K]  
 $Sr_2 = 2.608$  [kJ/kg-K]  
 $Sr_4 = 0.8099$  [kJ/kg-K]  
 $T1_{geo} = 100$   
 $T2_{geo} = 80$   
 $T_1 = 100$  [C]  
 $T_2 = 21.27$  [C]  
 $T_3 = -22.45$  [C]  
 $T_4 = -22.13$  [C]  
 $Tr_2 = 29.97$  [C]  
 $Tr_4 = -21.96$  [C]  
 $Tsat_1 = 66.23$  [C]  
 $V_3 = 0.001651$  [m<sup>3</sup>/kg]  
 $W_{iv} = 107.4$   
 $X_3 = 0$

**Arrays Table**

	$H_i$ [kJ/kg]	$Hr_i$	$P_i$ [BAR]
1	716.1		10
2	594	608.7	0.65
3	149.7		0.65
4	151.2	151.6	10

**Arrays Table**

	$S_i$ [kJ/kg-K]
1	
2	
3	
4	

14/07/2019 09:18:10 p.m.  
 Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883

**Arrays Table**

	$Sr_i$ [kJ/kg-K]	$T_i$ [C]
1		100
2	2.608	21.27
3		-22.45
4	0.8099	-22.13

**Arrays Table**

	$Tr_i$ [C]
1	
2	
3	
4	

Concentration must t

**Arrays Table**

	$Tsat_i$ [C]	$V_i$ [m <sup>3</sup> /kg]	$X_i$
1	The temperature supplied to the thermal conductivity lookup		
2			
3		0.001651	0
4			

There are a total of 41 equations in 11 blocks in the Main program.

Block	Rel. Res.	Abs. Res.	Equation
0	0.000E+00	0.000E+00	Ntv=0.88
0	0.000E+00	0.000E+00	Nb=0.8
0	0.000E+00	0.000E+00	m_geo=5
0	0.000E+00	0.000E+00	T1_geo=100
0	0.000E+00	0.000E+00	T2_geo=80
0	0.000E+00	0.000E+00	C_geo=4.217
0	0.000E+00	0.000E+00	C=1.794
0	0.000E+00	0.000E+00	Ngen=0.96
0	0.000E+00	0.000E+00	Ntm=0.87
0	0.000E+00	0.000E+00	P[1]=10[BAR]
0	0.000E+00	0.000E+00	T[1]=100[C]
0	0.000E+00	0.000E+00	P[2]=0.65[BAR]
0	0.000E+00	0.000E+00	X[3]=0
0	0.000E+00	0.000E+00	H[1]=ENTHALPY(Isobutane,T=T[1],P=P[1])
0	0.000E+00	0.000E+00	S[1]=ENTROPY(Isobutane,T=T[1],P=P[1])
0	0.000E+00	0.000E+00	Tsat[1]=T_SAT(Isobutane,P=P[1])
0	0.000E+00	0.000E+00	S[2]=S[1]
0	0.000E+00	0.000E+00	H[2]=ENTHALPY(Isobutane,S=S[2],P=P[2])
0	0.000E+00	0.000E+00	Hr[2]=H[1]-Niv*(H[1]-H[2])
0	0.000E+00	0.000E+00	T[2]=TEMPERATURE(Isobutane,H=H[2],P=P[2])
0	0.000E+00	0.000E+00	Sr[2]=ENTROPY(Isobutane,H=Hr[2],P=P[2])
0	0.000E+00	0.000E+00	Tr[2]=TEMPERATURE(Isobutane,H=Hr[2],P=P[2])
0	0.000E+00	0.000E+00	P[3]=P[2]
0	0.000E+00	0.000E+00	H[3]=ENTHALPY(Isobutane,P=P[2],X=X[3])
0	0.000E+00	0.000E+00	S[3]=ENTROPY(Isobutane,P=P[2],X=X[3])
0	0.000E+00	0.000E+00	T[3]=T_SAT(Isobutane,P=P[2])

14/07/2019 09:18:10 p.m.

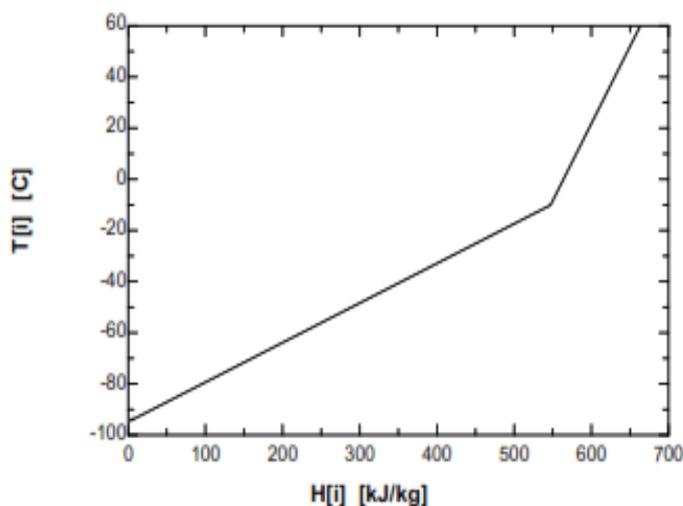
Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883

```

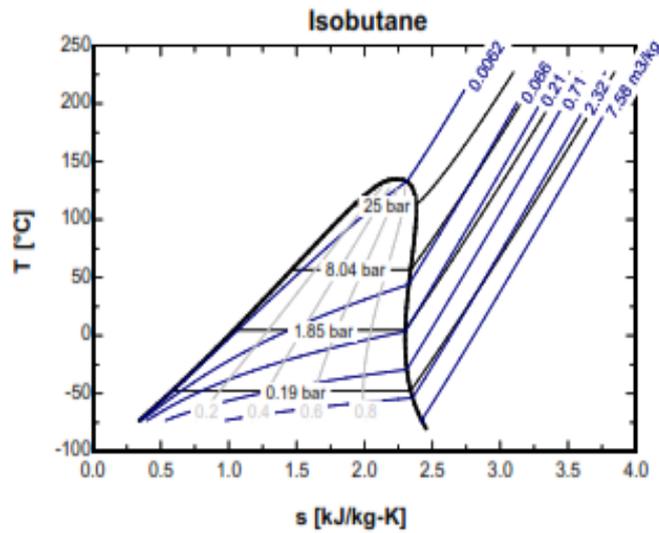
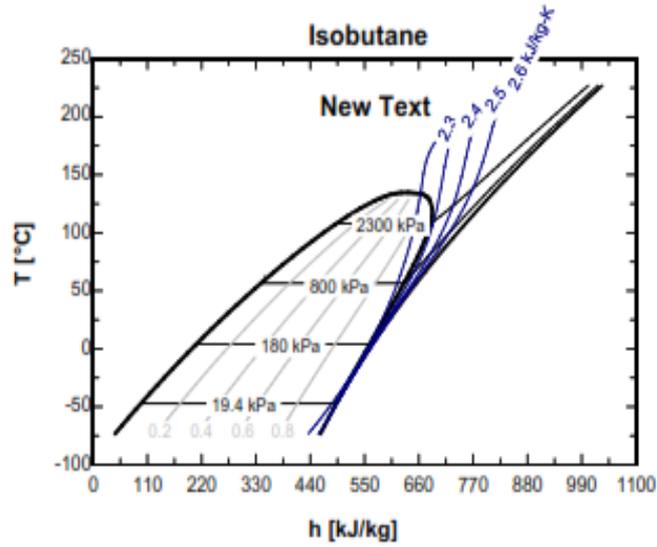
0  0.000E+00  0.000E+00  V[3]=VOLUME(Isobutane,P=P[3],X=X[3])
0  0.000E+00  0.000E+00  H[4]=H[3]+V[3]*(P[1]-P[2])*100
0  0.000E+00  0.000E+00  P[4]=P[1]
0  0.000E+00  0.000E+00  Hr[4]=H[3]-(H[3]-H[4])/Nb
0  0.000E+00  0.000E+00  W_tv=(H[1]-Hr[2])
0  *****  *****  m_gas=(m_geo*C_geo*(T1_geo-T2_geo))/(C*(T[1]-T[4]))
0  *****  *****  N_planta=(H[1]-Hr[2])/(H[1]-H[4])
0  *****  *****  T[4]=TEMPERATURE(Isobutane,H=H[4],P=P[4])
0  *****  *****  S[4]=ENTROPY(Isobutane,T=T[4],P=P[4])
0  *****  *****  Sr[4]=ENTROPY(Isobutane,H=Hr[4],P=P[4])
0  *****  *****  Tr[4]=TEMPERATURE(Isobutane,H=Hr[4],P=P[4])
0  *****  *****  P_bomba=(H[4]-H[3])*m_gas
0  *****  *****  P_neta=Ptv-P_bomba
0  *****  *****  Ptv=m_gas*(H[1]-Hr[2])
0  *****  *****  Pgen=P_neta*Ntm*Ngen
    
```

A bold block number indicates that the equation was not solved to tolerance.

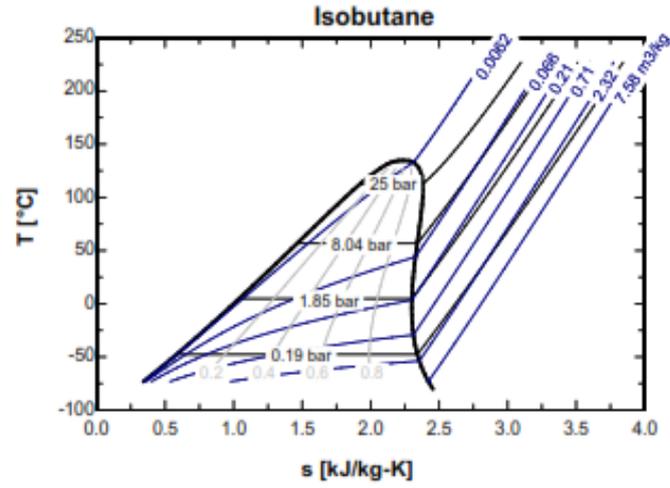
Variables shown in bold font are determined by the equation(s) in each block.



14/07/2019 09:18:10 p.m.  
 Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883



14/07/2019 09:18:10 p.m.  
Anexo 02: PROGRAMA UTILIZADO PARA CALCULOS EES Ver. 6.883



**ANEXO-03: FICHA TECNICA DEL 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:**

PES O MOLECUL	TEMPER. DE EBULLICI	TEMP CRÍTIC	PRESIO N CRITICA	GLIDE DE TEMPE	CALO R LATENTE A
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 alquilbencénico es la más apropiada para trabajar con este tipo de refrigerantes
POLIOLESTER (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**

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

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/m <sup>3</sup> )	
R600a (Isobutano)	1,8	0,043	460