

EVALUACION DE FACTIBILIDAD TECNICA PARA UNA PLANTA GEOTERMICA EN
PAIPA-IZA, BOYACA

JULIAN OSWALDO MARTINEZ BONILLA

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director:

NICOLAS FERREIRA BORRÁS
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director
Firma del director

Nombre
Firma del presidente Jurado

Nombre
Firmas del Jurado

Nombre
Firmas del Jurado

Bogotá, D.C. Febrero 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada Garcia Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres porque a pesar de las dificultades que presenta la vida siempre han sabido enseñarme a salir adelante y a no rendirme. Sin su apoyo incondicional en todos los ámbitos no hubiera podido llegar a donde estoy.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	15
ANTECEDENTES	16
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS	19
1.DELIMITACIÓN	20
2.MARCO CONCEPTUAL	21
2.1 Energía geotérmica	21
2.2 Recurso geotérmico	21
2.3 Clasificación de los recursos geotérmicos	21
2.4 Sistema geotérmico	22
2.5 Fuente de calor	23
2.6 Reservorio geotérmico	24
2.7 Sistema de suministro de agua	24
2.8 Capa sello	24
3. MARCO TEÓRICO	25
3.1 Vapor húmedo	25
3.2 vapor húmedo con temperatura menores a 150°C	26
3.3 Vapor saturado seco	26
3.4 Flash	26
3.5 Binaria	27
3.6 Tipos de turbinas	28
3.6.1 Turbinas de contrapresión	28
3.6.2 Turbinas de condensación	28
3.6.3 Turbinas de una o varias etapas	29
4. MARCO LEGAL	30
5. PROYECTOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA	33
5.1 Complejo Geotérmico the Geysers. 1.808 MW. Estados Unidos	33
5.2 Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México	34
5.3 Complejo Geotérmico Larderello. 769 MW. Italia	35
5.4 Complejo geotérmico Olkaria. 540 MW. Kenia	35
5.5 Complejo Geotérmico Makban. 458 MW. Filipinas	37

5.6 Complejo Geotérmico Salton Sea. 340 MW. Estados Unidos	38
5.7 Complejo Geotérmico Hellisheidi. 303 MW. Islandia	39
5.8 Complejo Geotérmico Tiwi. 289 MW. Filipinas	40
5.9 Complejo Geotérmico Darajat. 259 MW. Indonesia	41
5.10 Complejo Geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas	42
6. PROYECTOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA	43
6.1 Complejo geotérmico las maracas. 100 kW. Casanare	43
6.2 Proyecto Azufral de Túquerres- en el departamento de Nariño (Proyecto Azufral):	44
6.3 Proyecto geotérmico chiles-cerro negro-Tufiño	44
6.4 Proyecto geotérmico de Paipa	45
6.5 Proyecto geotérmico las Nereidas	45
7. PROCESO DE DISEÑO	46
7.1 lugares claves para realizar la caracterización	47
7.1.1 <i>Lago Sochagota</i>	47
7.1.2 <i>Sector la playa</i>	47
7.1.3 <i>la piscina olitas</i>	48
7.2 paipa estudio geotérmico	49
7.3 Caracterización del reservorio	52
7.3 Suposiciones	55
7.4 Especificación de equipos	55
7.5 Condiciones de las corrientes:	63
7.6 Generador	63
7.7 Precalentador, evaporador, condensador y recalentador	63
7.8 Bomba de producción	70
7.9 Diseño de bomba de agua de planta	72
7.10 Diseño de bomba de agua de inyección:	73
7.11 Turbinas de vapor	74
7.12 Parámetros del separador tipo ciclón	78
8. ANALISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE EQUIPOS	80
9. EFICIENCIA DE LA CENTRAL DE GENERACION ELECTRICA A PARTIR DE ENERGIA GEOTERMICA	81
10. CONDICIONES DE REINYECCION	82
11. FACTIBILIDAD TECNICA	85
11.1 caso 1: Valle Secolo, unidad 2	89

11.2 Caso 2: Miravalles, unidad 1	93
11.3 caso 3: Beowawe	97
12. CONCLUSIONES	100
BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	106

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de los recursos geotérmicos por temperatura	22
Figura 2. Distribución aproximada de temperaturas en el interior de la tierra	23
Figura 3. Temperatura global de la superficie terrestre y oceánica.	25
Figura 4. Esquema general de una planta tipo flash 1	27
Figura 5. Esquema general de una planta tipo binaria	28
Figura 6. Imagen de planta de Geysir	33
Figura 7. Imagen de planta de Cerro prieto	34
Figura 8. Imagen de planta de larderello	35
Figura 9. Imagen de planta de Olkaria	36
Figura 10. Imagen de planta de Makban	37
Figura 11. Imagen de planta de Salton	38
Figura 12. Imagen de planta de Hellisheidi	39
Figura 13. Imagen de planta de Tiwi	40
Figura 14. Imagen de planta de Darajat	41
Figura 15. Imagen de planta de Malitbog	42
Figura 16. Imagen de planta de Casanare	43
Figura 17. Ubicación geoespacial paipa-iza	46
Figura 18. Imagen de lago sochagota	47
Figura 19. Imagen de Sector la playa	48
Figura 20. Imagen de la piscina olitas	48
Figura 21. Ubicación del área geotermal de Paipa	49
Figura 22. Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa	54
Figura 23. Esquema de la planta geotérmica de generación de 10 MW	56
Figura 24. Condiciones de las corrientes por temperatura, presión y fase	63
Figura 25. Separador tipo Ciclon	79
Figura 26. Simulación Ciclo Rankine	82
Figura 27. Condiciones de extracción	83
Figura 28. Valores Turbina 2	83
Figura 29. Condiciones de inyección	84
Figura 31. Diagrama T-S del sistema	87
Figura 32 Simulación Valle Secolo, unidad 2	89

Figura 33. Turbina 1A: Valle Secolo, unidad 2	90
Figura 34. Turbina 2A Valle Secolo, unidad 2	90
Figura 35. Turbina 3A Valle Secolo, unidad 2	91
Figura 36 .Turbina 4A Valle Secolo, unidad 2	91
Figura 37. Turbina 5A Valle Secolo, unidad 2	92
Figura 38. Simulacion Miravalles, unidad 1	93
Figura 39. Turbina 1B Miravalles, unidad 1	94
Figura 40. Turbina 2B Miravalles, unidad 1	94
Figura 41. Turbina 3B Miravalles, unidad 1	95
Figura 42. Turbina 4B Miravalles, unidad 1	95
Figura 43. Turbina 5B Miravalles, unidad 1	96
Figura 44. Simulación Beowawe	97
Figura 45. Turbina 1C	98
Figura 46. Turbina 2C	98

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Temperaturas de entrada y salida de vapor y agua de cada equipo.</i>	67
Tabla 2. <i>Propiedades térmicas de los fluidos y materiales involucrados en el sistema.</i>	68
Tabla 3. <i>Sistema de dimensionamiento del sistema de tuberías.</i>	69
Tabla 4. <i>Propiedades térmicas en cada uno de los equipos.</i>	69
Tabla 5. Longitud y número de horquillas en cada equipo	70
Tabla 6. <i>Propiedades intrínsecas de la bomba.</i>	72
Tabla 7. <i>Análisis de la cavitación.</i>	72
Tabla 8. <i>Selección de la bomba de agua de la planta.</i>	73
Tabla 9. Selección de bomba	73
Tabla 10. <i>Propiedades intrínsecas de la bomba.</i>	73
Tabla 11. <i>Análisis de cavitación.</i>	74
Tabla 12. <i>Selección de la bomba de agua de inyección.</i>	74
Tabla 13. <i>Parámetros intrínsecos de turbina.</i>	76
Tabla 14. <i>Dimensionamiento de turbina.</i>	77
Tabla 15. <i>Diseño de turbina a baja presión.</i>	77
Tabla 16. <i>Dimensionamiento de la turbina.</i>	78
Tabla 17. Energía en el ciclo térmico.	81
Tabla 18. Condiciones sujetas en la turbina.	86
Tabla 19. Tabla comparativa de tres plantas geotérmicas	88

ABREVIATURAS

U = Coeficiente global de transferencia de calor

h_v = Coeficiente de convección del vapor

k = Conductividad térmica del acero

h_{ac} = Coeficiente de convección del agua caliente

ΔT = Diferencia de temperatura media logarítmica

T_{hi} = Temperatura de entrada del fluido caliente

T_{ho} = Temperatura de salida del fluido caliente

T_{ci} = Temperatura de entrada del fluido frío

T_{co} = Temperatura de salida del fluido frío

A = Área de transferencia de calor

Q = Calor transferido

U = Coeficiente global de transferencia de calor

ΔT = Diferencia de temperatura media logarítmica

L_{total} = Longitud total requerida para la transferencia de calor

A = Área de transferencia de calor

d_i = Diámetro interno del tubo interno del intercambiador de calor

e = espesor del tubo interno del intercambiador de calor

NH = Numero de horquillas del intercambiador de calor

L_{total} = Longitud total requerida para la transferencia de calor

L_{tubo} = Longitud del tubo del intercambiador de calor

W_r = Potencia requerida por la bomba

V̇ = Flujo volumétrico

P_s = Presión de salida de la bomba

P_e = Presión de entrada de la bomba

W = Potencia de la bomba

W_r = Potencia requerida por la bomba

E = Eficiencia de la bomba

$NPSH_d$ = Carga de succión positiva neta disponible

h_{sp} = Carga de presión estática

h_s = Diferencia de altura

h_{vp} = Carga de presión de vapor del líquido

A = Área transversal de la turbina

r = Radio de la turbina

\dot{m} = Flujo masico

V = Volumen especifico

v = Velocidad del fluido

A = Área transversal de la turbina

L = Longitud de turbina

Z = Altura de la turbina

RESUMEN

El objetivo principal de la presente investigación se basó en la evaluación de factibilidad técnica para una planta geotérmica en paipa-iza, Boyacá. El cual, se dividió en cuatro objetivos a resolver; caracterización del fluido geotérmico, diseñar un sistema de generación de vapor limpio utilizando calor de un reservorio geotérmico, realizar el diseño de la turbina de vapor para la generación eléctrica y finalmente determinar las condiciones de reinyección del fluido geotermal en el yacimiento para evitar la degradación del recurso.

Se caracterizo el reservorio geotérmico mediante los estudios de prefactibilidad, donde se determinó la temperatura, presión y flujo geotérmico. En los cuales se evidencio la temperatura en un rango de 200-230 °C, notándose un vapor de alta entalpia y su aplicación directa por medio de un sistema de carácter flash, la presión con un rango de 1000 a 2000 Kpa y finalmente un flujo de entrada de 28, 26 kg/s. como resultado de estos datos se evaluó la producción de 10 MW que se comparó con tres plantas (Valle Secolo, Miravalles, Beowawe), para demostrar su factibilidad técnica mediante software de simulación CHEMCAD comparando su eficiencia a partir de la cantidad de flujo requerido el desempeño de una planta geotérmica se mide que para una misma potencia al requerir menos flujo masico aumentara su eficiencia.

El diseño de los equipos del sistema se realizó según las temperaturas de salida y entrada de las diferentes tuberías, la presión del sistema además de las propiedades térmicas de los fluidos y materiales que tienen una mayor resistencia a la corrosión por parte de los fluidos geotérmicos.

Palabras clave: Geotermia, energía renovable, eficiencia, factibilidad, ciclo Rankine.

INTRODUCCION

En la última década, el aumento de la demanda energética en Colombia y el uso desmesurado de combustibles fósiles como lo son el petróleo, el gas, el carbón y recursos hídricos como indicó un informe realizado por la unidad de planeación minero-energética (UPME) [1]. Por otra parte en América latina, no existe una predisposición clara para la exploración de dichas energías, que continúan con sus métodos tradicionales para obtener energía los cuales causan un alto nivel de contaminación y causa fenómenos ambientales que están directamente relacionados a la producción energética del país [2], un claro ejemplo de esto son los resultados negativos provenientes del fenómeno del “niño”, ya que la generación de energía predominante en Colombia es la hidroeléctrica, durante este fenómeno el país experimenta sequías. causando una disminución en el nivel del agua que se traduce en una rebaja notable en la producción energética.

Para analizar esta problemática es necesario de mencionar sus causas a partir de una investigación bibliográfica de estudios de prefactibilidad en la comparación de 3 plantas geotérmicas (Valle Secolo, Miravalles, Beowawe) [3], para abordar un sistema de generación eléctrica por medio de un fluido de carácter geotérmico estimado en la zona de paipa-iza Boyacá, se propone su factibilidad técnica asegurando las condiciones de reinyección adecuadas para el proceso mediante software de simulación CHEMCAD, y contrastar la eficiencia del procesos al aplicar dos procesos de recalentamiento.

Se determina el tipo de vapor predominante en la planta geotérmica es el vapor alta entalpia superando temperaturas de 150°C [4] ajustando un sistema de reciclo diseñando una turbina alta y otra de baja presión para el uso de este vapor con el objetivo de incentivar el aprovechamiento térmico de fuentes naturales y demostrar su viabilidad para la transición de energía geotérmica transformándola a energía eléctrica para uso convencional.

ANTECEDENTES

En los últimos años la protección del ambiente en Colombia ha tomado importancia, derivado en gran medida de compromisos internacionales que se adquirieron con la firma de diferentes tratados. Esto ha generado normatividades específicas e incentivos que promueven la producción más limpia, en la generación de energía con fuentes renovables.

Un primer trabajo corresponde a Córdova (2017) en su tesis “Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica de 50 MW” en la universidad nacional de ingeniería (Lima-Perú) en la que explica como el uso de estos recursos geotérmicos tendría que estar orientado principalmente a generar energía eléctrica, por el motivo de encontrarse alejado de las zonas que cuentan con este recurso que hace difícil aprovechar directamente el calor para uso directo, como calefacción. Este estudio realizado da un conocimiento y el análisis de cómo se puede beneficiar de la electricidad, generada a través de este recurso.

Un segundo trabajo corresponde a Pulido (2018), en su tesis “Estudio y diseño preliminar de una planta de generación eléctrica a partir de energía geotérmica en la isla de Tenerife “en la Escuela superior de ingeniería y tecnología universidad de la laguna; la cual tiene como objetivo, partir de un recurso geotérmico de alta entalpia; estimado en la isla de Tenerife (islas canarias, España), busca estimar la capacidad del recurso geotérmico existente y la localización de este; a partir de estudios existentes a la fecha; y sus distintas licencias de exploración; bajo las cuales, se efectuaron dichos estudios.

En la investigación, busca la casi total dependencia energética del exterior, por lo que, esta tesis brinda las bases teóricas para el diseño de una hipotética central de energía geotérmica, junto a estudios previos sobre la explotación de dicho recurso; y sus consideraciones, en el diseño preliminar.

Un tercer trabajo corresponde a Chaparro (2018) en su investigación: “Diagnóstico ambiental de alternativas para el aprovechamiento del potencial geotérmico del paisaje salino en la vereda la esperanza, Paipa-Boyacá”; en la Universidad el bosque. Este trabajo se desarrolla en torno a la planeación ambiental-territorial, de diferentes actividades; con el fin de conducir al municipio a un escenario de aprovechamiento, del potencial geotérmico de menor impacto; y, mayor beneficio socioeconómico.

Este trabajo proporcionó, las primeras aproximaciones a un estudio de alternativas para el aprovechamiento de un recurso energético, colmado de incertidumbres por la carencia de estudios a nivel nacional; y, permitió establecer lineamientos técnico-económicos orientados a factores físicos, económicos y tecnológicos de la zona.

Un primer artículo “Comparativa de rendimiento energético entre un ciclo binario y uno modificado, con geotermia de baja entalpia “de los autores Aviña, León y Duran, publicado en la revista “Memorias del XIX congreso internacional anual de la somim en el año (2013); se presenta una comparativa entre un ciclo binario, sin modificar y uno modificado, con una evaporación flash. Teniendo como base de comparación, su respectivo rendimiento energético, ocupando un recurso geotérmico de baja entalpia; en donde se evalúa, con parámetros característicos, validados en la literatura.

Por ende, este artículo brinda las consideraciones de la selección de un ciclo binario PWG; frente a un ciclo convencional, sus ventajas y desventajas, los respectivos componentes, y, una caracterización de los posibles fluidos de trabajo, a tener en cuenta en el presente documento.

Un segundo artículo “Panorama preliminar para la construcción de una planta de energía geotérmica en el macizo volcánico del Ruiz “de los autores Ortiz y Mayorga publicado en la revista “Tecciencia “del año (2009); el cual recopila la información más importante de los estudios sobre energía geotérmica; que se han realizado en Colombia, para observar el potencial nacional y dar a conocer las oportunidades, que existen para la implementación, de esta tecnología en el país.

Para la presente investigación; este artículo ofrece una evaluación técnica básica; y técnica económica; de acuerdo con las propiedades, encontradas en el macizo del Ruiz, así como, demuestra el gran potencial que tiene Colombia, para el uso de la energía geotérmica.

JUSTIFICACIÓN

Es necesario la elaboración de estudios, que sean capaces de dar solución; o, una alternativa que posteriormente, puedan servir; de soporte para futuros proyectos; y, además, demostrar que, el uso de la tecnología geotérmica; es un medio eficiente, para minimizar la contaminación, en la producción de energía. Una planta de este tipo produce 1/5 de las emisiones de CO₂ de una central térmica a gas natural por kW producido; por lo que, generalmente, cumple con los límites de emisión establecidos. Este tipo de yacimientos utiliza vapor; cuya composición incluye gases no condensables, tales como CO₂, H₂S, NH₃, CH₄, N₂ y H₂ en valores entre 2.5 y 47 g/kg (gramos de contaminante por kg de vapor). Además, estas centrales no emiten gases tóxicos; o, perjudiciales para el ambiente (NO_x) ni (SO_x). En este contexto, el problema de contaminación del aire no resulta crítico; en los proyectos geotérmicos; anticipándose que, debieran cumplir con los límites de emisiones existentes; en la normativa, y gracias a que, Colombia está ubicada en el cinturón de fuego del pacífico (lugar donde chocan las placas tectónicas), lo que, genera extensas zonas volcánicas en la superficie; de las cuales, se forman yacimientos de agua a alta temperatura, apropiados para la explotación de la energía geotérmica.

Por lo tanto, el cambio climático está directamente relacionado a la transición energética; ya que su propósito es, sustituir las energías no renovables, debido a la sobreexplotación de combustibles fósiles; creando así, entornos más sostenibles; donde la economía circular, sea el modelo centralizado, de estos procesos; los cuales, en su mayoría, son fuentes inagotables, que permiten la diversificación; a partir de los recursos, y, la facilidad para usarlos.

Debe tenerse en cuenta; que en lo correspondiente a la Ingeniería Química; esta tiene un papel imprescindible, en el desarrollo del país; ya que, la ejecución de proyectos; en donde la parte ambiental, económica y social; son aspectos, en su mayoría relevantes. Es necesario abordar desafíos, en pro de investigaciones, que aporten el avance de la propia ingeniería.

La Ingeniería Química, es una de las mejores carreras, en formar para solucionar problemáticas; respecto a la implementación de las energías alternativas; como es el caso, del diseño de sistemas que se autoabastezcan; y, reduzcan costes de operación y eficiencia en el uso de la energía; por lo cual, realizar investigaciones y análisis; para poder desarrollar un sistema práctico; a partir de energías renovables, como la geotermia, es más que razonable.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar técnicamente un sistema generador de energía eléctrica partiendo de energía geotérmica, aplicado a la zona de paipa-iza en Boyacá.

Objetivos Específicos

1. Realizar la caracterización de los diversos factores Termodinámicos asegurando la existencia de un campo geotérmico explotable.
2. Diseñar un sistema de generación de vapor limpio utilizando calor de un reservorio geotérmico.
3. Realizar el diseño de la turbina de vapor para la generación eléctrica
4. Determinar las condiciones de reinyección del fluido geotermal en el yacimiento para evitar la degradación del recurso.

1. DELIMITACIÓN

Este trabajo partió del diseño hipotético de una planta geotérmica en paipa- iza a partir de un recurso geotérmico. Para esto, se realizó una revisión bibliográfica completa; que definió dicho recurso a partir de los estudios realizados anteriormente; junto a su posible ubicación, buscando un lugar idóneo; que contara con estudios de potencial geotérmico respecto a la zona, para poder así caracterizar los factores importantes y llegar a estimar el tamaño de la planta y posteriormente, su diseño.

También, se hizo una recolección respecto a los distintos tipos de centrales, que podrían emplear este recurso, para así escoger uno recomendado por la bibliografía utilizada. Para la selección de la planta, se analizó sus procesos energéticos (suponiendo algunas hipótesis previas), la producción de energía teórica, la reinyección de agua en el yacimiento geotérmico, para cada una de estas alternativas; y con ello, seleccionar la más óptima.

Esto define un análisis a los equipos principales, seleccionado los más indicados intentado escoger modelos comerciales para una mayor aproximación a la realidad.

Se planteó analizar el tratamiento necesario para el fluido geotermal y que este no conlleve a una sobreexplotación del recurso.

Por último, se definieron las partes del proyecto a ser excluidas:

- Estudio social
- Estudio económico
- Estudio de salud y seguridad
- Elaboración nivel laboratorio
- Planificación
- Pliego de condiciones

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Energía geotérmica

Se define como la energía proveniente del núcleo de la tierra; que, se da a través de las fisuras existentes, en el medio sólido, y solido-liquido, del interior de la corteza terrestre; la cual, aflora de los niveles más inferiores, a los más elevados; donde, dependiendo de las características geológicas; permanecerá y se acumulará, transmitiendo gran parte de su energía, a las aguas subterráneas [5].

Al descomponer el termino geotermia, la palabra “Geo” significa tierra, y “termia” significa calor, en conjunto “calor de la tierra”; definido como, el uso del agua, o vapor que, bajo presión, surge desde el subsuelo; y se puede aprovechar, para la generación de calor, o de energía eléctrica; mediante el uso de turbinas, y generadores de electricidad; que, en conjunto, se conoce como plantas de generación eléctrica[6].

La energía geotérmica tiene diferentes usos; entre ellos, la obtención de ácido bórico, bórax, sulfuro de vitriolo y aluminio; en algunos países, se usa para controlar la temperatura a condiciones particulares, proporcionar agua caliente; y, en algunos casos, obtener agua tratada para el consumo [7].

2.2 Recurso geotérmico

Se conoce como la parte de la energía geotérmica, o, calor proveniente del centro de la tierra; que, está en una condición, en la que puede ser aprovechada, por los humanos, tanto técnica como, económicamente. Se clasifican en dos tipos: Recursos geotérmicos de alta temperatura; que supera los 150°C y, recursos geotérmicos de media y baja temperatura; cuando no supera los 150 °C [8].

2.3 Clasificación de los recursos geotérmicos

Se pueden clasificar, de acuerdo con su temperatura; sin embargo, este parámetro no es suficiente, para definir un recurso geotérmico; ya que, es necesario al menos dos propiedades termodinámicas; para definir el recurso, como, por ejemplo, su entalpia. Los recursos con alta energía tienen la capacidad de generar electricidad; y los recursos de media, y baja energía, son buenos para aplicaciones, más directas [9].

Figura 1.

Clasificación de los recursos geotérmicos por temperatura

<i>Clasificación</i>	<i>A (°C)</i>	<i>B(°C)</i>	<i>C(°C)</i>	<i>D(°C)</i>
Alta entalpía	>150	>225	>200	>150
Media entalpía	90-150	125-225	100-200	-
Baja entalpía	<90	<125	<100	<150

Nota. Clasificación de los recursos geotérmicos por temperatura. Tomado de S. P. and B. S. Einar Tjörvi Eliasson, “*Geothermal Power Plants,*” pp. 15, jan 2008

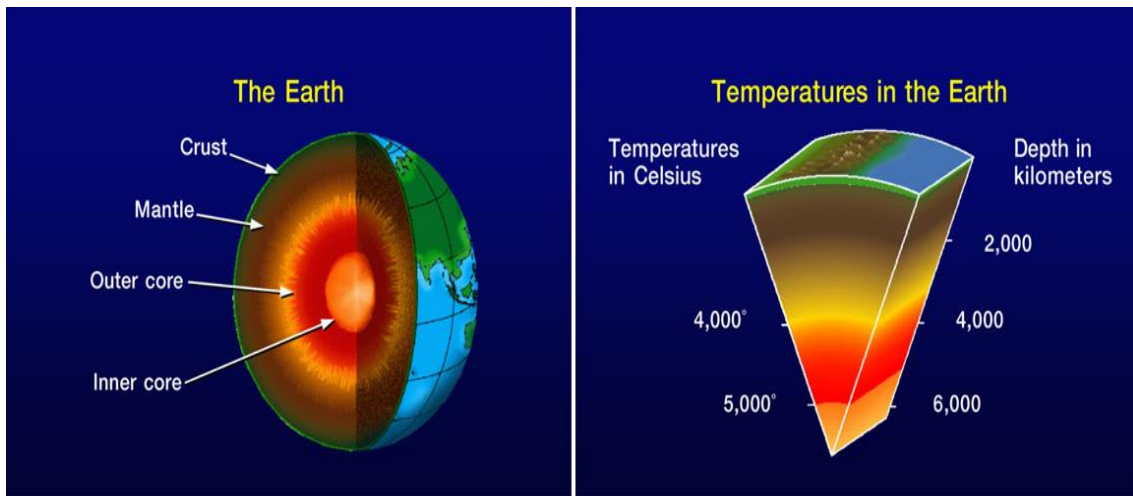
2.4 Sistema geotérmico

Se denomina así, a una fuente de calor, ubicada en una profundidad mayor, en la parte superior de la corteza terrestre. Además de, contener el fluido geotérmico, que se caracteriza, por ser un cuerpo de agua; que contiene minerales disueltos; que se calientan, y se vuelven menos densos.

Los sistemas geotérmicos se dividen en dos clases generales; una llamada sistema denominado por vapor (alta entalpía); y otra llamada sistema denominado por líquido, o agua (baja entalpía). Un sistema denominado por vapor produce este, desde ligeramente sobrecalentado; hasta saturado, a temperaturas de 250°C y presiones de 3000 Kpa y 3500 Kpa. Este depósito consiste en roca porosa, y, el flujo del pozo puede variar; ya sea, de unos cientos, hasta más de 25000 kilogramos/hora, desde profundidades entre 1000 y 25000 metros. En termino de gas no condensable, este varia desde 5% o más. Puede ser mayor, inicialmente, pero al momento de la extracción: disminuye por la acumulación pasada del sistema [10].

Figura 2.

Distribución aproximada de temperaturas en el interior de la tierra



Nota. Distribución aproximada de temperaturas en el interior de la tierra. Tomado de "Introduction to Geothermal Energy Slide Show" - Geothermal Education Office pp 8-14, April 2000.

Un sistema donde predomine el líquido; puede dividirse en dos tipos; el primero con fluidos de elevada entalpia, a más de 200 °C y, otro que tiene fluido, de baja entalpia. Esta división sirve para separar fluidos; que sean útiles, para la generación de energía eléctrica; por lo que los fluidos de baja entalpia; tienen propiedades, con mayor variación. Un elemento característico, es la sílice disuelta; que depende de la temperatura, y en menor proporción, elementos como el flúor y boro; los cuales, se encuentran en menor proporción. Los sistemas de baja entalpia, se encuentran desde unos 10 °C; en esta categoría, se incluyen las aguas de baja entalpia; debido a sus depósitos grandes, las temperaturas pueden variar de 50 a 60°C o hasta 120°C.

2.5 Fuente de calor

Puede ser una roca caliente, que ha incrementado su temperatura, al estar en contacto con un cuerpo volcánico intrusivo; gases calientes de origen magmático. Por lo general, la fuente de calor posee temperaturas mayores a los 600 °C, se pueden encontrar, a profundidades, mayores a dos kilómetros [11].

2.6 Reservorio geotérmico

Formación de rocas permeables, donde circula el fluido geotérmico, a profundidades económicamente explotables. Conocido también, como yacimiento geotérmico, es de tener en cuenta que, para extraer el calor del subsuelo; es necesaria la presencia de un fluido, que la transporte, y que, además, se requiere perforar, a una profundidad; que permita alcanzar las temperaturas óptimas; para la explotación; factores que implican unos costes y dificultad técnica que, se ven incrementados, con la profundidad [12].

2.7 Sistema de suministro de agua

Sistema de fallas o diaclasas en las rocas, que permiten la recarga del reservorio geotérmico, con el agua que se infiltra en el subsuelo. Este flujo reemplaza los fluidos, que salen del reservorio, en forma de manantiales termales; o aquellos que son extraídos, a través de pozos.

2.8 Capa sello

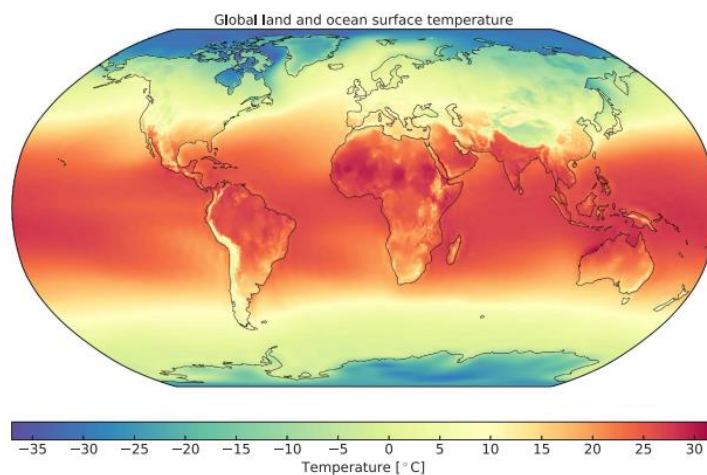
Estrato impermeable, generalmente compuesto por arcillas (esmectita o montmorillonita), producto de alteración de las rocas; por alta temperatura, que cubre el reservorio, lo contiene y evita la pérdida de agua y vapor.

3. MARCO TEÓRICO

Los usos para los yacimientos geotérmicos; varían, dependiendo de sus condiciones; ya sea para obtener vapor de procesos, energía térmica o, generar energía motriz en una turbina de vapor, con los equipos correctos su uso puede ser factible; las centrales geotérmicas, son plantas térmicas; ya que, al realizar los debidos estudios, y, comprobar el recurso geotérmico, existente en las cavidades de la tierra; se puede instalar, y proveer una potencia eléctrica constante, con una vida útil de alrededor de 30 años de producción ininterrumpida [13]. En la actualidad, más de ochenta países utilizan la energía geotérmica, de manera directa, por nombrar algunos. Los países con mayor uso directo de energía geotérmica son: China con 17,870 MWt, Estados Unidos con 17,416 MWt y Suecia con 5,600 MWt. Pese a lo anterior, solo 46 países aplican de manera directa recursos geotérmicos para generar energía eléctrica [14].

Figura 3.

Temperatura global de la superficie terrestre y oceánica.



Nota. Temperatura global de la superficie terrestre y oceánica.

Tomado de, A Yunus y M.A Boles, "*Renewable and Sustainable Energy Reviews*", 2015.

Dependiendo del tipo de fase, del fluido que contenga el yacimiento, y su temperatura, las especificaciones, para las centrales de generación de energía eléctrica son las siguientes:

3.1 Vapor húmedo

Requiere la implementación de una cámara de tipo flash, para separar el vapor de proceso que expande en la turbina. Una desventaja de este tipo de sistema, es que, solo una parte del fluido proveniente del reservorio, se puede utilizar. Pese a lo anterior, es posible instalar una segunda cámara flash para mejorar la eficiencia. Del total de las plantas termoeléctricas, a nivel mundial, el 40% tienen cámara flash, contribuyendo con el 60% de la capacidad instalada [15].

3.2 vapor húmedo con temperatura menores a 150°C

Se requiere de la implementación, de ciclos binarios; es decir, después de la separación, en la cámara flash; se reutiliza el agua líquida, para calentar o sobrecalentar el fluido secundario; con ello, generar potencia adicional, en un ciclo Rankine orgánico, o Kalina. En la actualidad, se tienen 266 unidades de este tipo de un total de 536 unidades geotérmicas; sin embargo, sólo contribuyen en un 10%, a la capacidad de generación instalada [16].

3.3 Vapor saturado seco

Se requiere suministrar, directamente a la turbina, por lo que, el vapor se pasa previamente por un secador, donde se disminuye, el porcentaje de agua líquida. Estas centrales poseen la mayor capacidad de generación; debido a que; trabajan con flujos completos, y no con fracciones, como en las centrales flash. El 11% de las centrales geotérmicas, son de este tipo, y corresponde al 26% de la capacidad instalada; con respecto a la energía, obtenida del recurso geotérmico [17].

El aprovechamiento de fluidos geotérmicos, para la generación eléctrica, se logra mediante un ciclo termodinámico, denominado Rankine; el cual, depende de la capacidad del vapor, para contraerse o expandirse; ejercerá una fuerza sobre los alabes de la turbina; causando un movimiento en su eje, para transmitir el movimiento a un generador eléctrico [18]. La generación de electricidad, por medio de energía geotérmica; se da mediante las siguientes tecnologías:

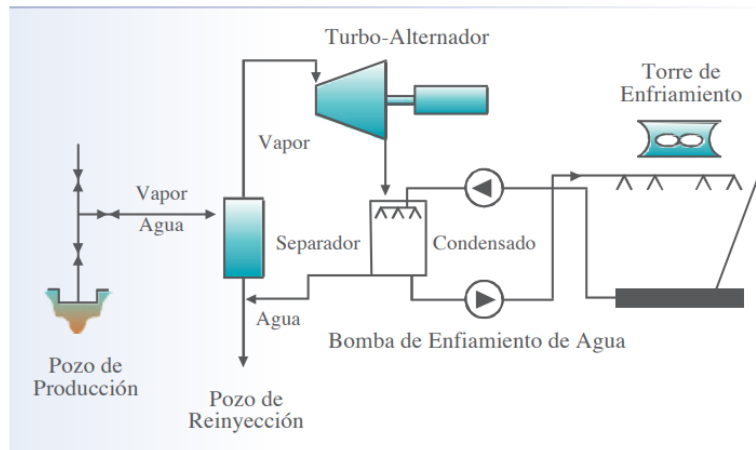
3.4 Flash

Denominado de vapor directo, esta tecnología se utiliza cuando se tiene fluidos geotérmicos, con temperaturas superiores a los 200 ° C en planta. Estos fluidos, pasan por un separador de vapor y

agua; el cual, inyecta el vapor a una turbina; causando que, se mueva el generador eléctrico; luego, pasando a un condensador, para que el fluido geotérmico, que ha cedido su calor; sea reinyectado a los reservorios. Dependiendo de la temperatura del vapor, a la salida del reservorio geotérmico; se requieren, una o dos cámaras Flash [19]. Se utilizan en condiciones, con vapor húmedo; ya que, son las más abundantes, en la naturaleza, por lo que el 88% de las unidades geotérmicas operan por sistemas con cámaras Flash. Adicionalmente, la mayoría operan con fluidos geotérmicos, a temperaturas menores a 200°C, a la salida del reservorio; lo que, es una limitante natural en la operación.

Figura 4.

Esquema general de una planta tipo flash 1



Nota. Esquema general de una planta tipo flash 1 Tomada de DiPippo, R., 1995. “*Geothermal Power Plants in the United States: A Survey and Update for 1990–1994*”. Geothermal Resources Council BULLETIN, 24: PP. 141–152.

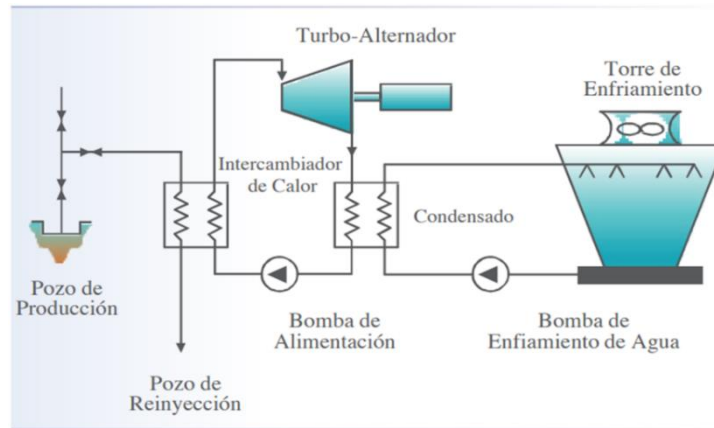
3.5 Binaria

Denominada ciclo cerrado; esta tecnología, es utilizada cuando se tienen fluidos geotérmicos; con temperaturas inferiores a los 200 ° c, en planta. En la tecnología binaria, los fluidos geotérmicos, se calientan por un compuesto orgánico; denominado fluido de trabajo; que, por medio de un intercambiador de calor, cede energía. Se usan compuestos orgánicos, como n-pentano o amoniaco, entre otros; pero, su característica principal, es que tengan puntos de ebullición bajos; y alta presión

de vapor, a bajas temperaturas. El vapor proveniente, se inyecta en una turbina, que a su vez, mueve un generador eléctrico; pasando a un condensador, y retornando al ciclo. El fluido geotérmico que ha cedido el calor; retorna al reservorio, mediante pozos de reinyección [20].

Figura 5.

Esquema general de una planta tipo binaria



Nota. Esquema general de una planta tipo binaria DiPippo, R. "Geothermal Power System," Sect. 8.2 in Standard Handbook of Powerplant Engineering, 2nd ed., T.C. Elliott, K.Chen and R.C. Swanekamp, eds., pp.8.27–8.60, McGraw-Hill, Inc., New York, 1998.

3.6 Tipos de turbinas

Propiedades intensivas como la temperatura y la presión definirán el tipo de turbina de vapor; que se diferencian por su capacidad, y eficiencia; entre estas, se pueden encontrar:

3.6.1 Turbinas de contrapresión

Se caracterizan por tener salidas de fluido con una presión, superior a la atmosférica; el vapor es más fácil de transportar, y puede ser utilizado, en otros procesos.

3.6.2 Turbinas de condensación

Se caracterizan por ser implementadas en procesos con intercambiadores de calor de tipo condensador donde se genera un empuje adicional por el vapor y su reinyección al reservorio geotérmico por este medio.

3.7.3 Turbinas de una o varias etapas

Se caracterizan de acuerdo a propiedades intensivas como la temperatura, presión y entalpía del fluido geotérmico, para su uso se pueden instalar turbinas ya sea multietapa o de una etapa, se dirige al condensador, donde finalmente es reinyectado. En las turbinas multietapa una fracción del vapor sale de la operación ; que, opera a alta presión, y entra a otra, que trabaja con vapor de menor presión, y así sucesivamente, hasta que el vapor pierde su capacidad de trabajo, y es descargado en el condensador; para su reinyección al campo geotérmico.

4. MARCO LEGAL

- De acuerdo con el código nacional de recursos naturales, y de protección del medio ambiente ley 2811 de 1974; define la propiedad del recurso geotérmico, tanto como su uso, definiciones, permisos y concesiones.
- El reglamento de código nacional de recursos naturales renovables, y de protección al medio ambiente, decreto 1541 de 1978, define, que se entiende por recursos geotérmicos, y cuáles son sus usos.
- El decreto 1076 de 2015, tomado del decreto 1541 de 1978 contempla:

Permiso para la prospección y exploración (Artículo 2.2.3.2.16.4).

Incluyen pruebas de perforación que consisten en localizar aguas subterráneas con el objetivo de aprovecharlas, ya sean en propiedad privada, requiere de sus respectivos permisos

Requisitos para la obtención del permiso (Artículo 2.2.3.2.16.5).

Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas; que pidan realizar exploraciones con el fin de localizar aguas subterráneas, deben presentar una solicitud ante los organismos ambientales, con los requerimientos para el manejo de estas aguas.

Anexos de solicitud de permiso (Artículo 2.2.3.2.16.6)

Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, deberán acompañar a la solicitud:

Tramite a cargo de la autoridad ambiental (Artículo 2.2.3.2.16.7)

Recibida la solicitud de exploración, debidamente formulada, la Autoridad Ambiental competente, procederá a estudiar, cada uno de los puntos relacionados en el artículo 2.2.3.2.16.5, de este Decreto, por intermedio de profesionales o técnicos en la materia.

Permisos y condiciones (Artículo 2.2.3.2.16.8)

Permiso y condiciones. Con base en los estudios, a que se refiere el artículo anterior, la Autoridad Ambiental competente, podrá otorgar el permiso. Si el beneficiario, fuere una persona natural, o jurídica privada.

Exploración y aspectos para considerar (Artículo 2.2.3.2.16.9)

Exploración y aspectos para considerar. En el proceso de exploración, se contemplarán los siguientes aspectos, para efectos del informe a que se refiere el artículo 2.2.3.2.16.10 de este Decreto:

1. Cartografía geológica superficial;
2. Hidrología superficial;
3. Prospección geofísica;
4. Perforación de pozos exploratorios;
5. Ensayo de bombeo;
6. Análisis fisicoquímico de las aguas. y
7. Compilación de datos sobre necesidad de agua existente y requerida.

Informe de permisionario (Artículo 2.2.3.2.16.10)

informe del permisionario. Al término de todo permiso de exploración de aguas subterráneas, el permisionario tiene un plazo de sesenta (60) días hábiles, para entregar a la Autoridad Ambiental competente, por cada pozo perforado, un informe que debe contener, cuando menos, los siguientes puntos:

Efectos del permiso de exploración (Artículo 2.2.3.2.16.12)

Efectos del permiso de exploración. Los permisos de exploración, de aguas subterráneas no confieren concesión, para el aprovechamiento de las aguas; pero, darán prioridad al titular del permiso de exploración, para el otorgamiento de la concesión en la forma

Aprovechamientos (Artículo 2.2.3.2.16.13)

Los aprovechamientos de aguas subterráneas, tanto en predios propios, como ajenos, requieren concesión de la Autoridad Ambiental competente; con excepción de los que utilicen, para usos domésticos, en propiedad del beneficiario o en predios que éste tenga posesión o tenencia.

Requisitos y trámite de concesión (Artículo 2.2.3.2.16.14)

La solicitud de concesión de aguas subterráneas, deber reunir los requisitos y trámites establecidos en la sección 9 de este capítulo.

La solicitud se acompañará, con copia del permiso de exploración y certificación; sobre la presentación del informe, previsto en el artículo 2.2.3.2.16.10, de este mismo estatuto.

5. PROYECTOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Existen diferentes proyectos vigentes en España y en algunas partes del mundo; en búsqueda de la ampliación, del uso de esta energía. La cantidad de países, que están construyendo proyectos geotérmicos, sigue creciendo. A partir de esto, el mercado del uso directo de la energía geotérmica ha generado interés en países del medio oriente, que buscan construir plantas de generación eléctrica con metas a corto plazo [21].

A continuación, se describirán 10 plantas de generación eléctrica a partir de energía geotérmica con el fin de realizar las comparaciones con las condiciones con mayor similitud al diseño planteado a continuación.

5.1 Complejo Geotérmico the Geysers. 1.808 MW. Estados Unidos

Figura 6.

Imagen de planta de Geysers



Nota. Imagen de planta de Geysers tomada de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

El Complejo Geotérmico The Geysers; ubicado a unos 116 kilómetros, al norte de San Francisco, California; se caracteriza por 21 plantas de energía; que, la convierten en la instalación geotérmica,

más grande, en el mundo. El complejo cuenta con una capacidad instalada de 1.808 MW y una capacidad de producción activa superior a los 1.000 MW, trabajando sólo al 63% de su capacidad de producción

5.2 Complejo Geotérmico Cerro Prieto. 820 MW. México

Figura 7.

Imagen de planta de Cerro prieto



Nota. Imagen de planta de Cerro prieto tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

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

5.3 Complejo Geotérmico Larderello. 769 MW. Italia

Figura 8.

Imagen de planta de larderello



Nota. Imagen de planta de larderello tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

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

5.4 Complejo geotérmico Olkaria. 540 MW. Kenia

Figura 9.

Imagen de planta de Olkaria



Nota. Imagen de planta de Olkaria tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

La central geotérmica Olkaria, es la mayor planta de su tipo en Kenia y la cuarta del mundo; con una capacidad instalada, de 540 MW entre las cuatro fases; a los que se sumarán, 140 MW de la quinta fase que se está desarrollando, en la actualidad. El complejo se halla ubicado en el Parque Nacional de Hell Gate, en Olkaria, condado de Nakuru; en el borde oriental del Valle del Rift, aproximadamente a 33 kilómetros, por carretera, al suroeste de Naivasha y a 120 km al noroeste de Nairobi , la capital de Kenia.

5.5 Complejo Geotérmico Makban. 458 MW. Filipinas

Figura 10.

Imagen de planta de Makban



Nota. Imagen de planta de Makban tomado de J. Roca. "*Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía*". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

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

5.6 Complejo Geotérmico Salton Sea. 340 MW. Estados Unidos

Figura 11.

Imagen de planta de Salton



Nota. Imagen de planta de Salton tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

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

5.7 Complejo Geotérmico Hellisheidi. 303 MW. Islandia

Figura 12.

Imagen de planta de Hellisheidi



Nota. Imagen de planta de Hellisheidi tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

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

5.8 Complejo Geotérmico Tiwi. 289 MW. Filipinas

Figura 13.

Imagen de planta de Tiwi



Nota. Imagen de planta de Tiwi tomado de J. Roca. "*Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía*". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

El Complejo Geotérmico Tiwi, se sitúa en la provincia de Albay; a unos 300 kilómetros, al sureste de Manila. Con 289 MW (neto), es la octava instalación geotérmica en el mundo; siendo propiedad, como el complejo de Makban, de AP Renewables; una filial de Aboitiz Power. El complejo se compone de tres plantas de energía; que disponen de dos unidades, cada una.

5.9 Complejo Geotérmico Darajat. 259 MW. Indonesia

Figura 14.

Imagen de planta de Darajat



Nota. Imagen de planta de Darajat tomado de J. Roca. "*Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía*". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

El Complejo Geotérmico Darajat, situado en Garut, en el Distrito de Pasirwangi, en Java Occidental; es la décima instalación geotérmica, en el mundo; con una capacidad instalada, de 259 MW; la cual, está gestionada por Darajat GPP Amoseas Indonesia, una subsidiaria de Chevron Texaco.

5.10 Complejo Geotérmico Malitbog. 233 MW. Filipinas

Figura 15.

Imagen de planta de Malitbog



Nota. Imagen de planta de Malitbog tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

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

6. PROYECTOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA

6.1 Complejo geotérmico las maracas. 100 kW. Casanare

Figura 16.

Imagen de planta de Casanare



Nota. Imagen de planta de Casanare tomado de J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 5 de agosto de 2023).

El complejo geotérmico las maracas, está ubicado en Campo Maracas, en el municipio de San Luis de Palenque (Casanare); es la primera generación de energía geotérmica, en el país y se denomina unidad de generación de energía geotérmica, de pequeña escala con una capacidad instalada de 100 kW; capaz de generar hasta 72.000 kWh / mes y consiste en coproducción de hidrocarburos y energía eléctrica limpia, a partir de los pozos petroleros.

En Colombia se han realizado diferentes estudios; los cuales, han demostrado que, se posee varias áreas de interés geotérmico; con suficiente potencial, para permitir la instalación de una capacidad

generadora de hasta 1000 MW [22]. Se detectaron cuatro sitios, con el potencial suficiente, para realizar investigaciones y proyectos geotérmicos:

6.2 Proyecto Azufral de Túquerres- en el departamento de Nariño (Proyecto Azufral):

Uno de los proyectos más importantes en términos de geotérmica en Colombia, es un volcán compuesto; es decir, su base es otro volcán, cuya porción somital, está hundida por un colapso calderico [23], los elementos de interés geotérmico son los siguientes:

- Larga persistencia de su actividad y edad reciente de al menos 400.000 años
- Presencia de una cámara magmática de alimentación; que se indica como fuente de calor considerable
- Presencia de cráteres de explosión, actividad fumarólica y de numerosos cuerpos termales
- Presencia de fragmentos rocosos hidrotermales, en los reservorios geotérmicos

Los estudios de factibilidad geotérmica en el azufral, se han dado desde 1999, en estos se incluyen la factibilidad del cambio geotérmico de Azufral y si es posible, considerar la participación del sector privado, en la inversión y desarrollo de estos recursos para su uso.

6.3 Proyecto geotérmico chiles-cerro negro-Tufiño

Este proyecto se encuentra ubicado, en los límites con el Ecuador. Sus características principales son:

- Alto grado de evolución vulcanológica, con por lo menos tres fases de actividad
- La última erupción fue hace unos 30.000 años y persistencia de actividad volcánica por un periodo de tiempo largo
- Presencia de cuerpos termales y de cráteres de explosión freática
- Evolución magmática compleja con variaciones de contenido de SiO₂ del 58% al 68%

En las investigaciones de factibilidad; se ha propuesto la ejecución de perforación, de al menos 700 m, cada una; cuyo objetivo, es realizar los diferentes estudios; con el fin de predecir, el gradiente térmico y su potencial para el uso del recurso geotérmico. Se encuentra en la fase de prefactibilidad; con estudios de geoquímica y geofísica [24].

6.4 Proyecto geotérmico de Paipa

Este proyecto se encuentra en la fase de prefactibilidad; se adelantaron investigaciones geológicas y geo eléctricas; en un área de 1000 km². En un principio, se identificaba el área como Paipa- iza, pero, con los estudios de prefactibilidad; desde el punto de vista geotérmico, Paipa e Iza, constituyen dos áreas separadas; donde, Paipa posee el mayor potencial, de uso geotérmico. Algunas de las características más importantes son:

- Manifestación de aguas termales, con aguas cloruradas-alcaldas
- Circuitos hidráulicos profundos (reservorio)
- Aguas sulfato-alcaldas; que deben su origen a la adición de sulfatos alcalinos, a las aguas precedentes.
- Predominancia de rocas sedimentarias; esencialmente, cretáceas y terciarias

Este proyecto se ubica en la cordillera oriental; en las cercanías de Paipa (Boyacá) y existen manifestaciones termales, de alta temperatura. Se destaca, la posible presencia de dos acuíferos térmicos; en rocas sedimentarias, con permeabilidad y sus reservorios, están ubicados, a una profundidad, entre los 1500 y 3000 m [25].

6.5 Proyecto geotérmico las Nereidas

Este proyecto, cuenta con la fase de prefactibilidad; ya que, en la década de los ochenta, el gobierno de Italia, financio sus estudios; pero, desde 1990, la empresa privada colombiana “Geoenergía Andina S.A. (GESA)”;

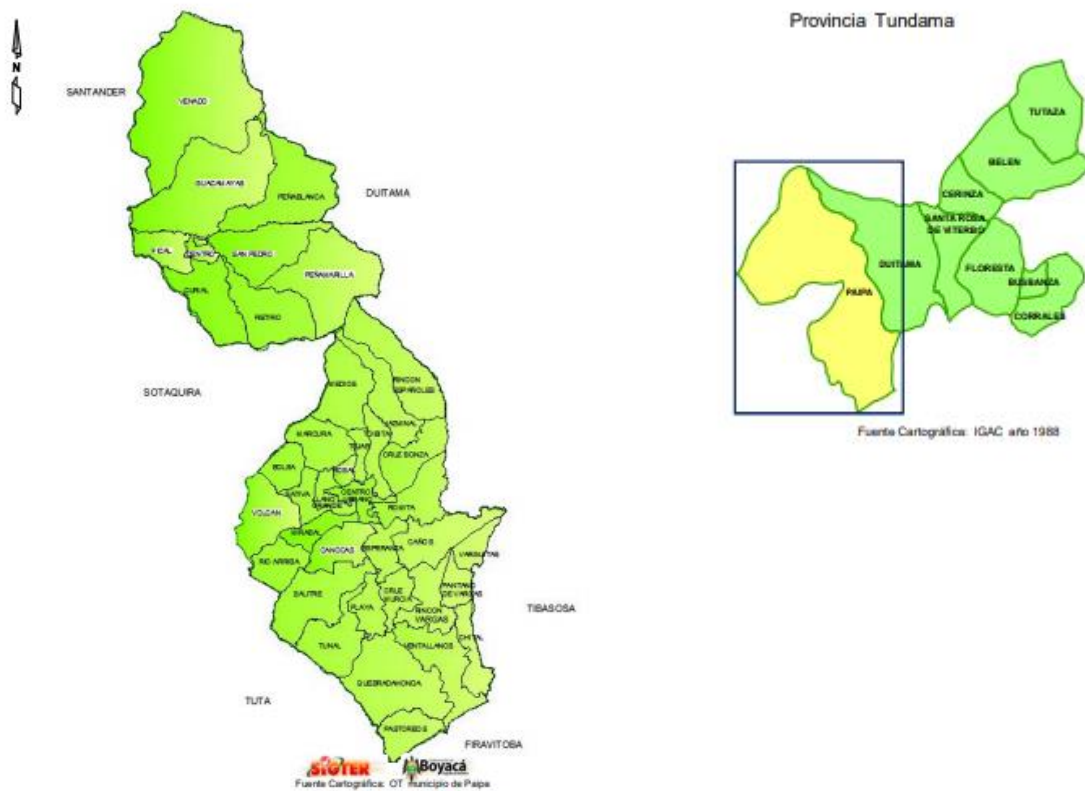
ha estado a cargo de la gestión y desarrollo del proyecto; buscando alianzas, con empresas, que cuenten con experiencia, en este sector; pero, debido a la inestabilidad del marco regulatorio colombiano; en lo que se refiere, a derechos de explotación, del recurso geotérmico; el avance de este proyecto; se ha visto interrumpido, hasta la concreción, de algún acuerdo [26].

7. PROCESO DE DISEÑO

Se inicio los estudios a partir del Servicio Geológico Colombiano (SGC) Y la Asociación Geotérmica Colombiana (AGEOCOL), se determinó ubicar la planta geotérmica en el municipio de Paipa debido a su potencial geotérmico de alta entalpía. Paipa es un municipio de Boyacá ubicado en la zona centro de Colombia, al noroeste de Tunja, pertenece a la provincia de Tundama, limita con Duitama y este se encuentra a 68 km por distancia de carretera de la capital Tunja dirección noreste, alberga más de 30000 personas según datos del DANE. Está ubicada a una altura de 2525 m sobre el nivel del mar, presenta una temperatura promedio anual de 14°C y un territorio de 31000 hectáreas equivalentes a 310 km^2 .

Figura 17.

Ubicación geoespacial paipa-iza



Nota. Ubicación geoespacial paipa-iza tomado de Sistemas de Información Territorial de la Gobernación de Boyacá (SIGTER). Tomado de: "Localización - Gobernación de Boyacá". Gobernación de Boyacá. <https://www.boyaca.gov.co/localizacion/> (accedido el 23 de febrero de 2023).

7.1 lugares claves para realizar la caracterización

A partir de los yacimientos geotérmicos adyacentes a estos lugares, se realizó la caracterización fisicoquímica buscando las condiciones con el mayor potencial de generación eléctrica a partir de un recurso geotérmico, partiendo de los estudios realizados. se definirá la caracterización del reservorio.

7.1.1 Lago Sochagota

Es un lago artificial que cuenta con área superficial de 1,8 km^2 y con un volumen de 0.004 km^3 , cuenta con una temperatura promedio cercana a los 14 °C similar a la temperatura promedio en paipa.

Figura 18.

Imagen de lago sochagota



Nota. I. t. Paipa. "Lago Sochagota – Sistema de Información Turística de Boyacá". Sistema de Información Turística de Boyacá – SITUR. <http://situr.boyaca.gov.co/attractivo-turistico/lago-sochagota/> (accedido el 16 de septiembre de 2022).

7.1.2 Sector la playa

Ubicado al Sur del sector Itp- lanceros, cuenta con varios manantiales que se encuentra a 76 °C como es el caso del pozo el Batan y el pozo el delfín.

Figura 19.

Imagen de Sector la playa



Nota. O. Paredes, "Sistema geotérmico hidrotermal de Paipa", Servicio Geológico colombiano, vol. 1, 2018, art. n.º 13. Accedido el 20 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Geotermia-en-paipa.pdf>

7.1.3 la piscina olitas

Esta cuenta con una temperatura de aproximadamente 22°C, la cual es anómala respecto a lo que se esperaría aun florecimiento normal de agua, esta recibe su caudal de agua de parte de las colinas posteriores que se encuentran cerca a este sector, esto causa que reciba un aporte de energía térmica

Figura 20.

Imagen de la piscina olitas



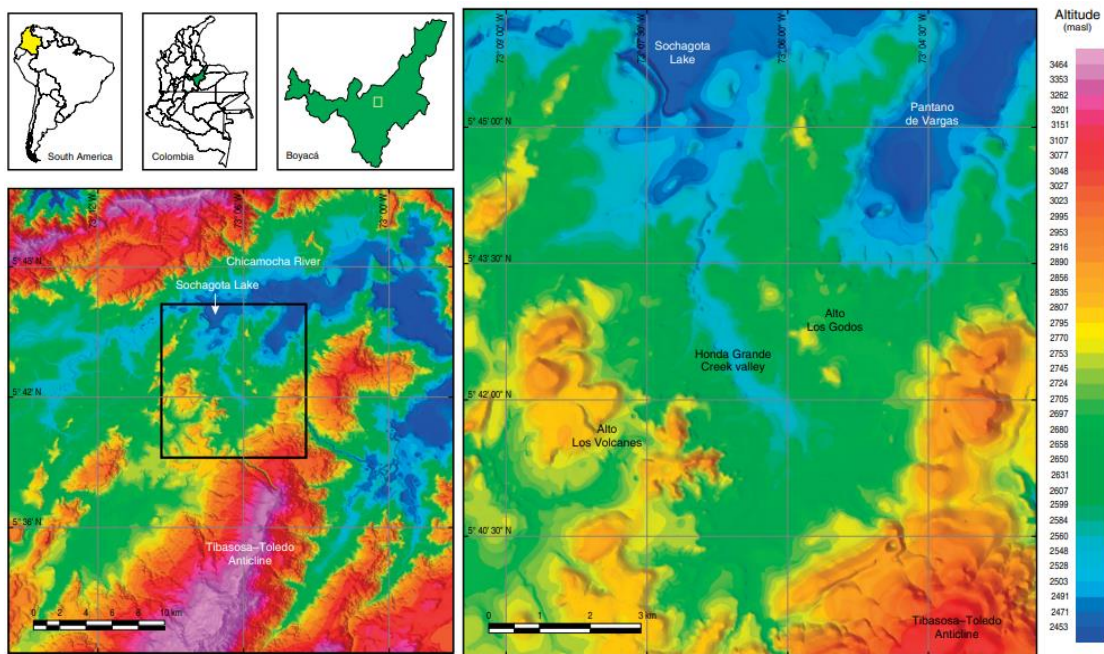
Nota. Paredes, "Sistema geotérmico hidrotermal de Paipa", Servicio Geológico colombiano, vol. 1, 2018, art. n.º 13. Accedido el 20 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Geotermia-en-paipa.pdf>

7.2 paipa estudio geotérmico

A partir de la caracterización de los yacimientos geotérmicos se llevó a cabo el estudio geotérmico que aseguro la existencia de un campo geotérmico explotable que se describe a continuación. El sistema geotérmico de paipa se encuentra a 2.525 metros sobre el nivel del mar, en un terreno inclinado de sur a norte hacia el rio Chicamocha, donde la geología está dominada por rocas sedimentarias instruidas por rocas magmáticas félsicas. La actividad volcánica del Mioceno y Pleistoceno produjo depósitos piroclásticos y complejos de domos. Un circuito profundo de agua salina sulfatada sódica, probablemente originado por la infiltración de agua meteórica seguida de una evaporación la cual se mezcló con fluido geotérmico [27].

Figura 21.

Ubicación del área geotermal de Paipa



Nota. Ubicación del área geotermal de Paipa tomado de Paipa Geothermal System, Boyacá: Tomado de *Review of Exploration Studies and Conceptual Model*

El Sistema Geotérmico de Paipa está ubicado en la parte axial de la Cordillera Oriental cerca de la ciudad de Paipa en la parte central del estado de Boyacá en Colombia. Las aguas termales ubicadas en esta zona han sido utilizadas con fines balneológicos en varias albercas y hoteles, pero su

potencial como fuente de energía no se ha cuantificado. El reservorio principal en este sistema geotérmico es parte de la Formación Une del Cretácico con reservorio secundario en las rocas fracturadas del Grupo Churuvita, y el fluido se mueve hacia arriba debido a una trayectoria compleja definida por la intersección de la profundidad principal NE-SO.

Se ha evidenciado varios intentos para estimar la temperatura del yacimiento de este sistema geotérmico utilizando geotermómetros convencionales, pero estos resultados muestran un alto grado de variación que es causado por una compleja superposición de mezcla de fluidos, que define la composición química de las fuentes termales en esta área. En los últimos años, la Geotermometría Multicomponente ha surgido como una herramienta poderosa para estimar las temperaturas del yacimiento en sistemas geotérmicos. La principal ventaja de este enfoque es el uso de la composición química completa de las muestras de fluidos geotérmicos, que se emplea en la estimación del rango de temperatura en el que el fluido está en equilibrio con los principales minerales que se supone forman el reservorio. Además, se pueden tener en cuenta procesos adicionales como los procesos de mezcla y desgasificación.

El área geotérmica de Paipa se caracteriza por abundantes descargas de agua y gas de aguas termales, estas se distribuyen en dos zonas principales de descarga los sectores ITP-Lanceros y La Playa. El sector ITP-Lanceros está ubicado cerca de la intersección de las fallas El Bizcocho y El Hornito en depósitos cuaternarios, y esta zona tiene el mayor número de aguas termales y los mayores caudales. El más representativo de ellos es Pozo Azul, que es de 56 °C y fluye a 6 L/s [28]. En el sector de La Playa, aproximadamente a 3,5 km al sur de la zona principal de descarga en la Formación Plaeners, hay menos manantiales, pero tienen las temperaturas más altas, que son de hasta 76 °C; hay un respiradero de vapor de baja presión a 75 °C.

Los manantiales de Salpa (llamados así por una planta de sal) tienen temperaturas de 21 °C y coinciden con los depósitos cuaternarios al noreste del sector ITP-Lanceros. El manantial de El Hervidero es un manantial intermitente burbujeante, que a los 21 °C emerge a través de depósitos a 1,5 km al sur de La Playa. El manantial de Olitas (23 °C) se encuentra en el complejo de cúpula del alto Los Volcanes. El pH de la mayoría de las aguas es neutro, y el alto TDS del ITP-Lanceros, La Playa y Salpa amortigua el pH. La excepción es el resorte El Hervidero, que es moderadamente ácido a pH = 3,7.

Según su clasificación química, el tipo de agua termal dominante, incluyendo las de los manantiales ITP-Lanceros, La Playa y Salpa, es el sulfato de sodio, con alta salinidad (20.000 a 60.000 mg/l de sólidos disueltos totales). El Hervidero y Olitas son manantiales de baja salinidad (<150 mg/l de sólidos disueltos totales) y se clasifican como sulfato de sodio y bicarbonato de sodio, respectivamente [29].

El patrón de especies disueltas de manantiales de Salpa es similar al de las aguas termales en los sectores ITP-Lanceros y La Playa. La mayor temperatura de primavera (El Batán) es la menos afectada por la mezcla. La composición isotópica de El Hervidero se desvía de la tendencia de mezcla y muestra un agotamiento muy significativo de oxígeno 18 que posiblemente se deba al fraccionamiento de ^{18}O entre CO_2 y H_2O .

El mayor contenido de oxígeno 18 corresponde a los manantiales de Salpa, y existe una correlación directa entre la concentración de sulfato de sodio y el enriquecimiento de ^{18}O . Esto no se debe a la interacción agua-roca a alta temperatura, sino a la mezcla. La composición del agua meteórica del miembro final es δD -75% y $\delta^{18}\text{O}$ -11%. La elevación estimada de la recarga es de aproximadamente 2800-2900 msnm. A partir de esto, y considerando que la Formación Une tiene buena permeabilidad, el Anticlinal Tibasosa-Toledo, ubicado al este del área de estudio, es probable que sea la principal zona de recarga [30].

Las aguas termales en ITP-Lanceros y las aguas termales en Salpa y El Hervidero se caracterizan por una fuerte descarga de gas continua. La composición gaseosa de algunos muelles está dominada por el CO_2 , con una concentración de CH_4 inferior a la esperada para los fluidos geotérmicos ($\text{CH}_4 / \text{CO}_2 < 0,0001$), que podría estar relacionado con la entrada de gas magmático de bajo metano o con entornos oxidantes asociados a una interacción prolongada con aguas subterráneas aireadas.

Los geotermómetros acuosos y gaseosos parecen no ser fiables debido a la falta de fluido profundo equilibrado en las descargas de aguas termales. Los geotermómetros alcalinos no son aplicables, ya que la contribución de la fuente salina es dominante, lo que es evidente en la parcela triangular de Na-K-Mg. La fuente de concentraciones elevadas de sodio, sulfato y otras especies de iones se debe probablemente a la disolución de un depósito de evaporita. Los geotermómetros SiO_2 indican temperaturas de hasta 120 °C, y utilizando un modelo simple de entalpía-sílice [31], la temperatura de equilibrio más alta posible es cercana a 230 °C.

7.3 Caracterización del reservorio

Los datos estimados a partir de la caracterización de los yacimientos geotérmicos comprenden principalmente los datos que tienen que ver con el recurso, con su reinyección y especialmente su producción.

- Nombre: formación Une
- Ubicación: En la zona del alto de los volcanes, justo encima de la caldera subterránea
- Área de la caldera: 31 km^2 , con un largo máximo de 11 km y una amplitud máxima de 6 km, situada entre 8 y 10 km de profundidad
- Volumen estimado del reservorio: 1.1 km^3
- Temperatura estimada del reservorio: 220- 320 °C
- Presión (presión de saturación): 2318 - 11284 kPa
- Profundidad: 200 – 600 m
- Flujo volumétrico estimado: 60 L/s, equivalente a un flujo masico aproximado de 58, 67 kg/s, teniendo en cuenta el volumen especifico de pozos someros $P= 76\text{ kPa}$ a 70°C
- Temperatura de un pozo geotérmico superficial: 70°C

Se selecciono la ubicación debido a su conveniencia y tamaño en la formación une, se describe por arenisca Permeables de una porosidad granular moderada de tal manera que permite el flujo de agua, además el volumen del reservorio se estimó con estudios de sondeos eléctricos y electromagnéticos que detecto la resistividad propia del fluido comparándola con la resistividad de las rocas, La temperatura de 220- 320 °C se determinó con geotermómetros y la presión de 2318 - 11284 kPa es la de saturación a esas temperaturas.

Se calculo que a 10 km de profundidad se encontró la fuente magmática y los reservorios geotérmicos se encontraron a una profundidad de 1 km, el sistema geotérmico contemplo una serie de fallas por donde el magma comenzó a elevarse haciendo contacto con el agua que fluyendo a las profundidades provenientes de la lluvia, cuentan con sectores de recarga denominados

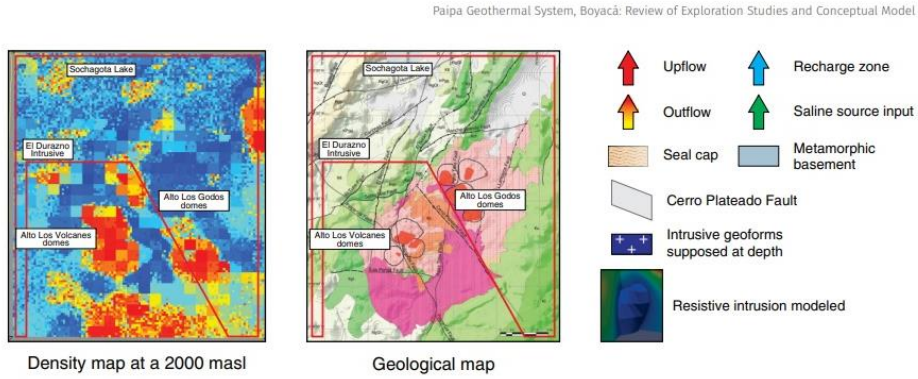
anticlinal Tibasosa Toledo y el anticlinal del tabuco que se encuentran en los extremos del reservorio geotérmico donde se puede resaltar un reservorio de agua principalmente ubicado debajo de donde estuvo el volcán a 600 metros, el agua inicia su recorrido en la zona piscina olitas y el manantial de los viejos que se encuentran a 22 °C, aunque el agua nace a una temperatura de 76°C a la del reservorio geotérmico a 600 metros de profundidad, pero debido a la existencia de una capa sello que componen de rocas las cuales impiden que el agua pueda florecer, esta busca su salida por medio de la falla cerro plateado, desplazando el agua a la zona norte del sistema geotérmico de paipa, donde podemos ubicar el lago sochagota, de esta manera nace un venteo de vapor en donde se localizaba el volcán de paipa y el sector la playa.

El agua va a nacer a 76°C en el sector de la playa que son 3 km al norte donde se observa el volcán y se encuentra el reservorio geotérmico principal por lo que el sector la playa y el sector ITP lanceros se encontró en dirección noroeste de 4 km donde nace el pozo azul que tiene una temperatura cercana entre 55 y 60 °C, se puede observar que el agua del sector la playa posee una temperatura mayor que el del sector ITP lanceros, eso es debido que el agua cuando traslada desde su posición original pierde energía térmica cediéndola a las rocas o capas adyacentes por cada metro recorrido.

Esta descripción del Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa es presentada en la figura 22, presentada a continuación

Figura 22.

Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa



Quaternary

Nota. Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa. Las flechas indican el posible recorrido del agua desde las zonas de recarga hacia la zona de estudio (circunferencia blanca) tomado de Servicio Geológico Colombiano.

7.3 Suposiciones

Para determinar los parámetros de diseño y tipo de planta más adecuados para la explotación de energía geotérmica se tuvieron en cuenta las siguientes hipótesis de trabajo:

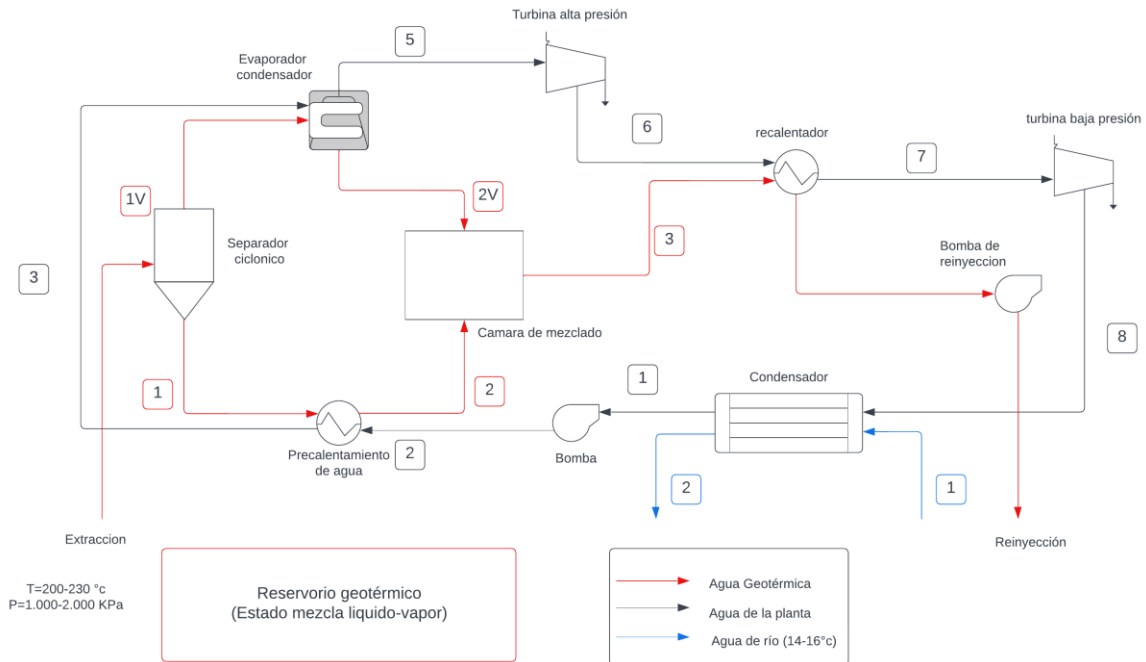
1. Se utilizó un Sistema de operación estacionario para tener un mayor control en los cambios térmicos del sistema.
2. La influencia de la energía cinética se consideró despreciable por su mínima influencia en el cambio térmico de la planta.
3. Los equipos como turbinas y bombas se consideraron adiabáticos.
4. Las bombas pueden regular las pérdidas de carga variando su presión.
5. Se consideró el fluido geotérmico como agua desmineralizada para los cálculos.
6. Las condiciones de temperaturas dependen de las aguas termales que estén más cerca al sistema volcánico de Paipa, por lo que se usó un rango entre 70 a 250 °C.
7. Al realizar una separación de fases de una misma sustancia se optó por una planta Flash
8. La Capacidad de esta planta se determinó por la entalpía general del pozo.
9. Se consideró humedad con valor de 0 a la salida de la turbina como evaporación nucleada, además de una eficiencia isentrópica de 0,85 aproximadas en las turbinas y bombas.
10. Se estimó el río Chicamocha con una temperatura ambiente de 14°

7.4 Especificación de equipos

Primero se desarrolló un modelo simulando las condiciones de operación a partir de la caracterización de los yacimientos geotérmicos para luego realizar el diseño de los componentes de la planta geotérmica que se tomara como tipo Flash, este tipo de planta se eligió por para lograr uso más efectivo del recursos geotérmico, debido a que los fluidos tiene un amplio Rango de propiedades tales como temperatura, presión, presencia de gases no condensables, sólidos disueltos, pH, potencia de corrosión. Este sistema de conversión de energía se puede adaptar a las condiciones particulares anteriormente mencionadas [19]. se tomarán las suposiciones previas a el diseño que se describe la figura 23.

Figura 23.

Esquema de la planta geotérmica de generación de 10 MW



Nota. Esquema de planta geotérmica para la generación de 10 MW

El diseño consistió en la extracción del fluido de un pozo productor en estado Líquido- vapor, se inició con la separación del fluido geotérmico en el reactor Flash (SC-001), por medio de este se realizó una segmentación de desechos sólidos por los fondos y recuperando el vapor en el reboiler; el vapor es transferido al evaporador-condensador (IC-002) en este se realizó un intercambio de calor entre el vapor geotérmico al agua de planta, donde prosiguió a la turbina (TAP-001) generando la primera producción de energía de la planta geotérmica; posterior el vapor pasa por el recaentador (IC-003) con el fin de aprovechar el calor residual evitando perdidas en la gradiente de energía generando la potencia de la turbina (TBP-001) donde el vapor residual se desplaza al condensador (IC-004) por medio de este se aprovecha el rio Chicamocha para aclimatar el vapor residual por convección. Se reintegra el precalentador (IC-001) para generar un reciclo en el sistema, ayudando a la eficiencia térmica al inicio del proceso. El agua que ha sido expandida y

que pasa de su estado de vapor mediante el recalentador (IC-003) termina siendo reinyectada mediante la bomba (P-002) en el pozo de tal manera que cumple un ciclo renovable.

Balances de materia y energía planteados en planta de recuperación de energía geotérmica:

Ecuación 1. Balance de energía en bomba:

$$W = V1 * \Delta P$$

Donde:

W: Trabajo realizado por la bomba.

V1: Volumen del agua en corriente 1.

ΔP : Cambio de presión del agua entre corriente 1 y 2.

$$W = 0.00101 \frac{m^3}{kg} * 12.87 \frac{kg}{s} * (1000 - 10) Kpa = 12.87 KW$$

Ecuación 2. Balance de energía en precalentador:

$$Q = M2 * \Delta H$$

Donde:

Q: Calor transferido en el precalentador.

M2: Masa del agua en corriente 2.

ΔH : Cambio de entalpia entre las corrientes 2 y 3.

$$Q = 12.87 \frac{kg}{s} * (419.17 - 192.8) \frac{KJ}{Kg} = 2913.67KW$$

Ecuación 3. Balance de energía en evaporador-condensador:

$$Q = M3 * \Delta H$$

Donde:

Q: Calor transferido en el evaporador-condensador.

M3: Masa del agua en corriente 3.

ΔH : Cambio de entalpia entre las corrientes 3 y 5.

$$Q = 12.87 \frac{kg}{s} * (2828.3 - 419.17) \frac{KJ}{Kg} = 31008.6KW$$

Ecuación 4. Balance de energía en la turbina de alta presión:

$$W = M5 * \Delta H$$

Donde:

W: Trabajo generado en la turbina.

M5: Masa del agua en corriente 5.

ΔH : Cambio de entalpia entre las corrientes 5 y 6.

$$W = 12.87 \frac{kg}{s} * (2828.3 - 2327.1) \frac{KJ}{Kg} = 6451KW$$

Ecuación 5. Balance de energía en recalentador:

$$Q = M6 * \Delta H$$

Donde:

Q: Calor transferido en el recalentador.

M6: Masa del agua en corriente 6.

ΔH : Cambio de entalpia entre las corrientes 6 y 7.

$$Q = 12.87 \frac{kg}{s} * (2877.8 - 2327.1) \frac{KJ}{Kg} = 7088.1KW$$

Ecuación 6. Balance de energía en la turbina de baja presión:

$$W = M7 * \Delta H$$

Donde:

W: Trabajo generado en la turbina.

M7: Masa del agua en corriente 7.

ΔH : Cambio de entalpia entre las corrientes 7 y 8.

$$W = 12.87 \frac{kg}{s} * (2877.8 - 2583.9) \frac{KJ}{Kg} = 3783KW$$

Ecuación 7. Balance de energía en condensador:

$$Q = M8 * \Delta H$$

Donde:

Q: Calor transferido en el condensador.

M8: Masa del agua en corriente 8.

ΔH : Cambio de entalpia entre las corrientes 1 y 8.

$$Q = 12.87 \frac{kg}{s} * (2583.9 - 191.8) \frac{KJ}{Kg} = 30789.4KW$$

$$Q = Mar * Cp * \Delta T$$

Donde:

Q: Calor transferido en el condensador.

Mar: Masa del agua de rio.

ΔT : Cambio de temperatura en el agua de rio.

$$Q = 294.635 \frac{kg}{s} * 4.18 \frac{KJ}{Kg * ^\circ C} (40 - 15)^\circ C = 30789.4KW$$

Balances de materia y energía en corriente de agua geotérmica:

Ecuación 8. Balance de energía en precalentador:

$$Q = M2 * \Delta H \rightarrow M2 = \frac{Q}{\Delta H}$$

Donde:

Q: Calor transferido en el precalentador.

M2: Masa del agua geotérmica a la salida del precalentador.

ΔH : Cambio de entalpia del agua geotérmica.

$$M2 = \frac{2913.67KW}{(2847.3 - 2643)KJ/Kg} = 14.26Kg/s$$

Ecuación 9. Balance de energía en evaporador-condensador:

$$Q = M2V * \Delta H \rightarrow M2V = \frac{Q}{\Delta H}$$

Donde:

Q: Calor transferido en el evaporador-condensador.

M2V: Masa del agua geotérmica a la salida del evaporador-condensador.

ΔH : Cambio de entalpia del agua geotérmica.

$$M2V = \frac{31008.6KW}{(2847.3 - 632.2)KJ/Kg} = 14Kg/s$$

Ecuación 10. Balance de materia en el mezclador:

$$M3 = M2V + M2$$

Donde:

M3: Masa de agua geotérmica a la salida del mezclador.

M2V: Masa del agua geotérmica a la salida del evaporador-condensador.

M2: Masa de agua geotérmica a la salida del precalentador.

$$M3 = 14Kg/s + 14.26Kg/s = 28.26Kg/s$$

Ecuación 11. Balance de energía en recalentador:

$$Q = M3 * \Delta H$$

Donde:

Q: Calor transferido en el recalentador.

M3: Masa de agua geotérmica a la salida del mezclador.

ΔH : Cambio de entalpia de agua geotérmica en recalentador.

$$Q = 28.26 \frac{kg}{s} * (1646.96 - 1396.14) \frac{KJ}{Kg} = 7088.1KW$$

Ecuación 12. Potencia neta generada:

$$W_{neto} = W_{turbinas} - W_{bomba}$$

Wneto: Trabajo generado en el sistema.

Wturbinas: Trabajo generado en las turbinas.

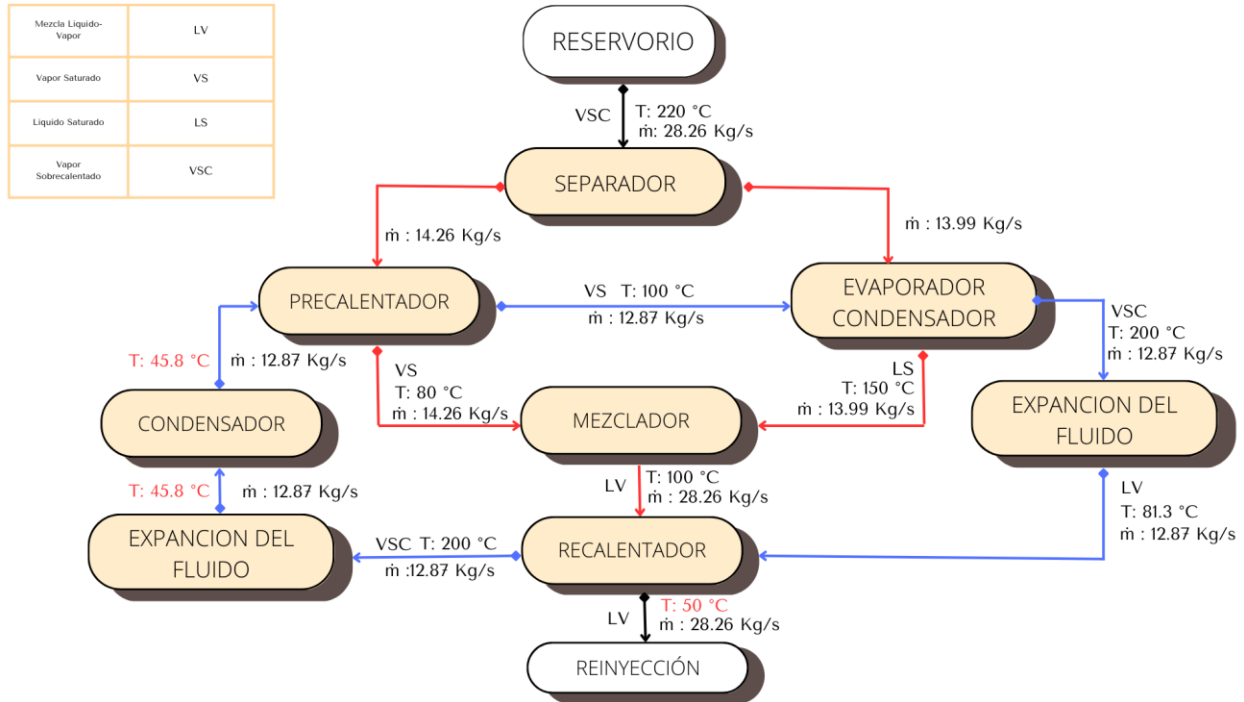
Wbomba: Trabajo requerido por la bomba.

$$W_{neto} = 6451KW + 3783KW - 12.87KW = 10221KW$$

7.5 Condiciones de las corrientes:

Figura 24.

Condiciones de las corrientes por temperatura, presión y fase



Nota. Condiciones de las corrientes por temperatura, presión y fase

7.6 Generador

La turbina mediante un eje común se acopla al generador. Este generador se encarga de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, se debe considerar que estos tienen una gran cantidad de componente de cobre o plata, por lo que son altamente susceptibles a la corrosión y deben mantenerse en un ambiente libre de sulfuro de hidrogeno, el cual se pueden encontrar en los vapores de alta temperatura de los recursos geotérmicos, por lo tanto, se plantea la opción de enfriarlo con nitrógeno gaseoso para contrarrestar la corrosión [29].

7.7 Precalentador, evaporador, condensador y recalentador

La selección de diseño respecto a los intercambiadores de calor se tomó como Doble tubo, esto por aprovechar el contacto térmico sin la necesidad de mezclar los fluidos, en este caso favoreciendo la recirculación garantizando las óptimas condiciones en la reinyección del fluido geotérmico y los procesos de recalentamiento, además, es importante la selección del material en contacto con el fluido geotérmico, el cual se debe sobreponer a las exigencias térmicas, de presión y potencial corrosivo alargando la vida útil del sistema y asegurar la seguridad del proceso [30].

están formados por dos tubos concéntricos de diferente diámetro, donde uno de los fluidos circula por el tubo interior y el otro lo hace por el espacio que existe entre ambos tubos. Estos intercambiadores de calor son ampliamente usados en las distintas industrias debido a su económico diseño y mantenimiento, además se pueden utilizar a alta presión y temperatura. También debido a su popularidad, todos los componentes están estandarizados, lo que facilita mucho las reparaciones y el mantenimiento.

Análisis de diseño de los intercambiadores de calor

Ecuaciones:

Ecuación 13. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_v} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_{ac}}}$$

Estrictamente hablando la expresión sería:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_v} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) d_i}{2k} + \frac{d_i}{h_{ac} d_o}}$$

Donde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor

h_v = Coeficiente de convección del vapor

k = Conductividad térmica del acero

h_{ac} = Coeficiente de convección del agua caliente

Ecuación 14. Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica:

$$\Delta T = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}\right)}$$

Donde:

ΔT = Diferencia de temperatura media logarítmica

T_{hi} = Temperatura de entrada del fluido caliente

T_{ho} = Temperatura de salida del fluido caliente

T_{ci} = Temperatura de entrada del fluido frío

T_{co} = Temperatura de salida del fluido frío

Ecuación 15. Cálculo del área de transferencia de calor:

$$Q = U * A * \Delta T \rightarrow A = \frac{Q}{U * \Delta T}$$

Donde:

A = Área de transferencia de calor

Q = Calor transferido

U = Coeficiente global de transferencia de calor

ΔT = Diferencia de temperatura media logarítmica

Ecuación 16. Cálculo de la longitud total requerida:

$$L_{total} = \frac{A}{\pi * (d_i + 2 * e)}$$

Donde:

L_{total} = Longitud total requerida para la transferencia de calor

A = Área de transferencia de calor

d_i = Diámetro interno del tubo interno del intercambiador de calor

e = espesor del tubo interno del intercambiador de calor

Ecuación 17. Cálculo del número de horquillas del intercambiador de calor:

$$NH = \frac{L_{total}}{2 * L_{tubo}}$$

Donde:

NH = Numero de horquillas del intercambiador de calor

L_{total} = Longitud total requerida para la transferencia de calor

L_{tubo} = Longitud del tubo del intercambiador de calor

El diseño de los equipos del sistema se realizó según las temperaturas de salida y entrada de las diferentes tuberías descritas en la tabla 1, además de las propiedades térmicas de los fluidos y materiales involucrados en el sistema como se evidencia en la tabla 2, para el óptimo intercambio térmico se describe el dimensionamiento de la tubería y numero de horquillas en la tabla 3 y 5, a partir de los descrito anteriormente se obtienen el calor trasferido, y dimensiones totales del equipo en la tabla 4.

Tabla 1.

Temperaturas de entrada y salida de vapor y agua de cada equipo.

Equipo	Tubo interno		Tubo Externo	
	Vapor (°c)		Agua de planta (°c)	
Pre-Calentador	220	80	46	100
evaporador-condensador	220	150	100	200
Recalentador	100	50	81,3	200
Condensador	45,8	45,8	15	40

Nota. tabla 1 temperatura de diseño para los intercambiadores de calor (°c)

Se puede observar un comportamiento particular en la salida del tubo interno y el tubo externo, ya que la temperatura de salida de los fluidos aparentemente no atiende a los balances de energía, esto se debe a una diferencia entre el poder calorífico de los fluidos y por lo tanto, la temperatura equivalente en respuesta al calor que entra o sale del fluido debido a los mecanismos de transferencia de calor son diferentes.

Cabe destacar que la temperatura está relacionada con el poder calorífico, es decir, a mayor poder calorífico, es más difícil cambiar la temperatura de un fluido o elemento y viceversa.

Por otro lado, en la condensación se observa un cambio de fase, en el cual vapor mezclado se convierte en líquido saturado debido a la condensación, lo que no se observa en un cambio de temperatura del fluido de trabajo, pero si se puede percibir en el fluido de condensación.

Las propiedades térmicas que se especifican a continuación se relacionan con una temperatura y presión anteriormente definida, ya que las propiedades de esta naturaleza son en función a la temperatura en la cual se realiza la interacción y la presión en la que se produce la misma; por lo que es necesario definir con anticipación el valor de cada propiedad para obtener resultados acordes a las condiciones dadas durante la transferencia de calor, se describen en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Propiedades térmicas de los fluidos y materiales involucrados en el sistema.

Fluido	h(W/m²°C)
Agua de planta	1.000
Agua geotérmica	3.500
Vapor	10.500
Material	k(W/m°°C)
Acero	50

Nota. Tabla 2 Propiedades térmicas de los fluidos y materiales involucrados en el sistema para el diseño de los intercambiadores de calor.

Ha de tenerse en cuenta las propiedades de convección de los fluidos involucrados, como se denota en la tabla, el agua geotérmica posee un poder de convección mayor en el aporte de energía por metro cuadrado de transferencia y por grado de temperatura, lo que hace ideal como Fuente de calentamiento para el agua de planta. El material debe tener poca resistencia a la transferencia, para poder transmitir dicha energía al agua de planta para su evaporación. Debe tenerse en cuenta, que el agua de planta tiene un grado de pureza ideal para el proceso, en cambio el vapor geotérmico es para el uso exclusivo de evaporación en el sistema.

El sistema de tuberías debe tener en cuenta tres aspectos principales, la primera es la transferencia de calor que se efectúa entre el tubo externo y el tubo interno, siendo el externo el tubo que lleva el fluido de trabajo y el interno el que lleva el fluido de calentamiento durante el trabajo de precalentamiento, evaporación y recalentamiento.

El otro aspecto importante a tener en cuenta son los esfuerzos asociados al movimiento del fluido, ya que estos presionan las paredes produciendo una fuerza en un área determinada y traduciéndose en una deformación.

Finalmente se debe tener en cuenta los materiales que se puede obtener con facilidad en Colombia, por lo que las medidas corresponden a catálogos nacionales.

Tabla 3.*Sistema de dimensionamiento del sistema de tuberías.*

Equipos	Tubo	D nominal (in)	D interno (m)	Espesor (m)
Pre-Calentador	Interno	4	0,1023	0,00602
	Externo	6	0,1541	0,00711
evaporador-condensador	Interno	6	0,1541	0,00711
	Externo	8	0,2027	0,00818
Recalentador	Interno	4	0,1023	0,00602
	Externo	6	0,1541	0,00711
Condensador	Interno	6	0,1541	0,00602
	Externo	8	0,2027	0,00818

Nota. Tabla 3 Sistema de dimensionamiento del sistema de tuberías diámetros internos y externos para el diseño de los intercambiadores de calor.

Se puede observar un comportamiento particular en el coeficiente global de transferencia de calor (U), esto se debe a las propiedades térmicas de los materiales y fluidos no se alteran, es decir, que no hay cambios significativos en la presión y la temperatura en el medio de trabajo.

El área es la superficial de las tuberías, en otras palabras, la cantidad de superficie en la cual se realiza el intercambio de energía, tener mayor área superficial, implica tener mayor flujo de energía.

Además, el área superficial depende del diámetro de las tuberías y de la longitud de estas, es decir, tener mayores longitudes no siempre implica tener mayor área superficial.

Tabla 4.*Propiedades térmicas en cada uno de los equipos.*

Equipos	Q (kW)	U (W/m ² °C)	ΔT (°C)	A (m ²)	L (m)
Pre-Calentador	2.913,7	1.994,6	68,2	21,4	59,6
evaporador-condensador	31.008,6	1.994,6	32,7	474,8	909,7
Recalentador	7.088,1	1.994,6	59,1	60,1	167,3
Condensador	7.088,1	1.994,6	15,0	237,3	454,7

Nota. Tabla 4 Propiedades térmicas en cada uno de los equipos para el diseño de los intercambiadores de calor

Tabla 5.

Longitud y número de horquillas en cada equipo.

Equipos	Longitud de tubo (m)	# Horquillas
Pre-Calentador	6	5
evaporador-condensador	10	45
Recalentador	6	14
Condensador	6	38

Nota. Tabla 5 Longitud y número de horquillas en cada intercambiador de calor

7.8 Bomba de producción

La bomba es la máquina que le adiciona la energía al fluido para que este realice el recorrido que se requiere en el proceso. El recurso geotermal y el agua del proceso presentan una serie de desafíos con los que las bombas de producción deben lidiar. Se destacan los siguientes:

- Altas temperaturas a los ejes de transmisión se pueden estirar, provocando desalineación del eje.
- La posibilidad de agrietamiento por corrosión por sobreesfuerzo de tensión.
- El vapor sobrecalentado a alta velocidad es altamente erosivo.

Estos desafíos se tendrán en consideración para el diseño y elección de material de las bombas involucradas en sistema de generación eléctrica a partir de un recurso geotérmico.

La bomba de producción se usa para bombear el fluido ya condensado de vuelta a la fuente de calor en un circuito, pasando por los intercambiadores de calor y turbinas del sistema. El flujo a la entrada siempre es conocido, ya que será un líquido (agua de planta) tras el condensado, para el cual se conoce la temperatura, ya que se escoge como dato de partida. También se conoce el cambio de presión requerido, con lo cual se logra determinar la potencia requerida por la bomba.

Análisis de diseño de las bombas:

Ecuaciones:

Ecuación 18. Cálculo de la potencia requerida:

$$Wr = \dot{V} * (Ps - Pe)$$

Donde:

Wr = Potencia requerida por la bomba

\dot{V} = Flujo volumétrico

Ps = Presión de salida de la bomba

Pe = Presión de entrada de la bomba

Ecuación 19. Cálculo de la potencia de la bomba:

$$W = \frac{Wr}{E}$$

Donde:

W = Potencia de la bomba

Wr = Potencia requerida por la bomba

E = Eficiencia de la bomba

Ecuación 20. Cálculo del NPSH disponible:

$$NPSHd = hsp + hs - hvp$$

Donde:

NPSHd = Carga de succión positiva neta disponible

hsp = Carga de presión estática

hs = Diferencia de altura

hvp = Carga de presión de vapor del líquido

7.9 Diseño de bomba de agua de planta

Con el fin de cumplir con los parámetros térmicos iniciales del precalentador se debe iniciar a una presión de 1000Kpa, el flujo de la salida del condensador al solo llegar a 10Kpa es necesario implementar una bomba centrífuga para garantizar los requerimientos secuenciales entre los equipos.

Tabla 6.

Propiedades intrínsecas de la bomba.

Variables	Valor	Unidades
ΔPresion	990	Kpa
Caudal	13	L/s
Potencia	17,26	HP
Eficiencia	85	%
Potencia bomba	20,30	HP

Nota. Tabla 6 Propiedades intrínsecas de la bomba

Tabla 7.

Análisis de la cavitación.

Variable	Unidad (m)
Carga de presión estática	1,02
Diferencia de altura	5,00
Carga de presión de vapor	1,02
NPSH disponible	5,00

Nota. Tabla 7 Análisis de la cavitación.

Tabla 8.

Selección de la bomba de agua de la planta.

Variable	Valor	Unidad
Carga total	100,92	m
Caudal	206,05	gpm
NPSH requerido	7,20	ft
NPSH requerido	2,19	m
Bomba centrífuga de 2 x 3 - 10, a 3500 rpm		

Nota. Tabla 8 Selección de la bomba de agua de la planta.

Para cumplir con los requerimientos térmicos se selecciona una bomba con la capacidad de surtir el flujo de agua requerido, este de acuerdo con un análisis de cavitación para evitar daños internos en el sistema de tuberías este seleccionado según la carga total, una vez identificado los requerimientos De la bomba se selecciona la bomba de agua de planta.

7.10 Diseño de bomba de agua de inyección:

Tabla 9.

Selección de bomba

Presión entrada (KPa)	Presión salida (KPa)
12,35	1.554

Nota. Tabla 9 Selección de bomba

Tabla 10.

Propiedades intrínsecas de la bomba.

Variable	Valor	Unidades
Δ Presion	1.541,65	KPa
Caudal	28,26	L/s
Potencia	58,42	HP
Eficiencia	85%	%
Potencia bomba	68,73	HP

Nota. Tabla 10 Propiedades intrínsecas de la bomba.

Tabla 11.

Análisis de cavitación.

Variable	Unidades(m)
Carga de presión estática	1,26
Diferencia de altura	5,00
Carga de presión de vapor	1,26
NPSH disponible	5,00

Nota. Tabla 11 Análisis de cavitación.

Tabla 12.

Selección de la bomba de agua de inyección.

Variable	Valor	Unidades
Carga total	157,15	m
Caudal	447,93	gpm
NPSH requerido	15,20	ft
NPSH requerido	4,63	m
Bomba centrífuga de 1(1/2) x 3 - 13, a 3560 rpm		

Nota. Tabla 12 Selección de la bomba de agua de inyección

Las bombas de producción requieren del empleo de materiales que disminuyan los problemas de la corrosión por incrustaciones a alta temperatura y los problemas de erosión relacionados con el bombeo de pozos de producción, el diseño fue dictado a partir de parámetros como la profundidad del pozo, su diseño y su temperatura.

7.11 Turbinas de vapor

Las turbinas de vapor son turbomáquinas motoras, que transforman la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo y el rodete. Para este proceso se emplean dos turbinas, una de alta y una de baja, sus parámetros de dimensionamiento son el flujo volumétrico, además de la temperatura y presión de operación. Para las turbinas de la planta, la energía suministrada proviene del agua

geotérmica y se empleará una temperatura de 200°C y una presión de 1000 kPa para la turbina de alta presión y temperatura de 200 °C y una presión de 50 kPa para la turbina de baja presión.

Análisis de diseño de las turbinas

Ecuaciones:

Ecuación 21. Cálculo del área transversal:

$$A = \pi * r^2$$

Donde:

A = Área transversal de la turbina

r = Radio de la turbina

Ecuación 22. Cálculo del flujo volumétrico:

$$\dot{V} = \dot{m} * V$$

Donde:

\dot{V} = Flujo volumétrico

\dot{m} = Flujo masico

V = Volumen especifico

Ecuación 23. Cálculo de la velocidad:

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

Donde:

v = Velocidad del fluido

A = Área transversal de la turbina

\dot{V} = Flujo volumétrico

Ecuación 24. Cálculo de la longitud:

$$L = \frac{\dot{V}}{Z * (rs + re)}$$

Donde:

L = Longitud de turbina

\dot{V} = Flujo volumétrico

Z = Altura de la turbina

rs = Radio de salida

re = Radio de entrada

Diseño de turbina de alta presión

El fluido al salir de la turbina pierde temperatura y presión, lo que a su vez afecta la entalpía; esta pérdida es el efecto del trabajo mecánico con esto se puede evidenciar la producción de energía mecánica desde la turbina. Por otro lado, se puede observar que el flujo másico se mantiene constante, pero al cambiar la presión y la temperatura del fluido, se debe alterar el fluido atendiendo la ley de gases ideales, lo que significa que el volumen aumenta en consecuencia.

Finalmente, la presencia de calidad en la salida significa que el fluido que sale de la turbina es una mezcla entre líquido y vapor; además, la turbina recibe vapor sobrecalentado en la entrada por lo que no hay concepto de calidad ya que todo es vapor. Lo anterior implica posibles daños asociados a la corrosión en las turbinas.

Tabla 13.

Parámetros intrínsecos de turbina.

Condiciones	Entrada	Salida	Variables
T	200	81,3	°C
P	1.000	50	KPa
h	2.828,3	2327,11	KJ/Kg
M	12,87	12,87	Kg/s
V	0,21	2,79	m ³ /kg
Estado	liquido	Mezcla	
Calidad	N/A	86,2%	

Nota. Tabla 13 Parámetros intrínsecos de turbina

Tabla 14.*Dimensionamiento de turbina.*

Dimensiones	Entrada	Salida	Unidades
radio	0,4	0,8	m
Área	0,50265	2,01062	m ²
V	2,65149	35,94950	m ³ /s
V	5,27496	17,87982	m/s
Z	1,50		m
L	1,47		m

Nota. Tabla 14 Dimensionamiento de turbina.

Así mismo como para la primera turbina el fluido al salir de la turbina pierde temperatura y presión y por ello cambia el fluido atendiendo la ley de gases ideales, lo que significa que el volumen aumenta en consecuencia.

Sin embargo, la temperatura y presión de salida al ser menores, se produce menos trabajo en la turbina. Además, esta configuración de presión y temperatura permite obtener vapor sobrecalentado a la salida de la turbina, por lo que no habrá problemas de corrosión en la turbina.

Tabla 15.*Diseño de turbina a baja presión.*

Condiciones	Entrada	Salida	Unidades
T	200	45,8	°C
P	50	10	KPa
h	2.877,8	2.583,90	KJ/Kg
M	12,87	12,87	Kg/s
V	4,36	14,67	m ³ /kg
Estado	vapor	liquido	
Calidad	N/A	100,0%	

Nota. Tabla 15 Diseño de turbina a baja presión.

Tabla 16.

Dimensionamiento de la turbina.

Dimensiones	Entrada	Salida	Unidades
radio	1,5	3	m
Área	7,06858	28,27433	m ²
V	56,07119	188,82178	m ³ /s
V	7,93245	6,67820	m/s
Z	2,00		m
L	6,23		m

Nota. Tabla 16 Dimensionamiento de la turbina.

Para evitar la posibilidad de agrietarse o de corrosión, se diseña el rotor con una longitud más grande para el uso geotérmico, por lo que su diámetro máximo es bastante grande y las tensiones en los bordes para las láminas serán altas. Los alabes de las turbinas de vapor de carácter geotérmico son de tipo reacción que son más confiables y eficientes.

Los materiales de fabricación para el rotor de la turbina serán una aleación de Cr y Mo, que se encargara de mantener solida los ejes y soportes. Se evitan materiales como el Ni por su poca resistencia a la corrosión. La parte externa es hecha de acero con aleación de Al y Cr [31].

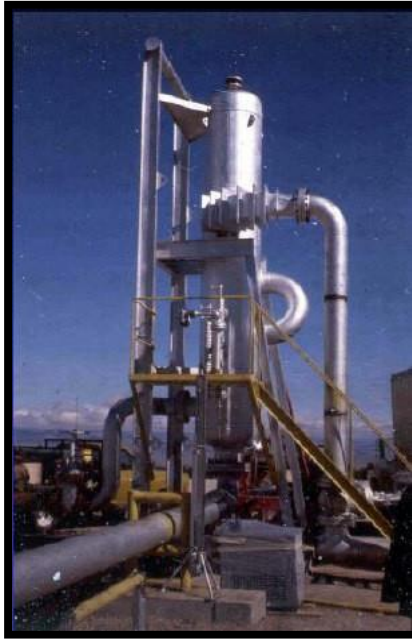
7.12 Parámetros del separador tipo ciclón

Realizar la separacion de fases antes de llevar el vapor con la energia geotermica es importante para una planta de generacion geotermica. El fluido geotermico se carcteiza por poseer sustancias altamente corrosivas para los equipos en el sistema. Estos separadores se ubicaron a un distncia fija de la central geotermico[32].

El separador seleccionado es del tipo ciclón, donde el fluido geotérmico con las dos fases (líquido y vapor) es dirigido horizontal y tangencialmente dentro de un recipiente de presión cilíndrico vertical, las especificaciones son las siguientes:

Figura 25.

Separador tipo Cyclon



Nota. Separador tipo ciclón tomado de "The Basics of Geothermal Power Conversion" - John W. Lund. Geo-HeatCenter, Oregon Institute of Technology, 2004.

Presión de operación: 2000 kPa

Temperatura : 212.40 °C

El líquido saturado se dirige circunferencialmente a lo largo de la pared interna y sale por la parte inferior. El vapor se dirige hacia arriba y se expulsa a través de una tubería de alimentación vertical.

El depurador seleccionado es del tipo corrugado, el cual se instala antes de la planta de potencia para eliminar la humedad adicional. El vapor sobrante se lanza a la atmósfera a través de una válvula de venteo.

El silenciador es de concreto con apilados de madera, se coloca cerca de la planta de potencia para reducir el nivel de ruidos del vapor lanzado.

8. ANALISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO DE EQUIPOS

Surgiendo de un análisis geométrico del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa se delimitan los requerimientos para el diseño de la planta geotérmica. Se da inicio a una transferencia de energía térmica entre el agua geotérmica al agua de planta de 2.913,7 Kw con un el equipo IC-001 de diseño de tubo y coraza con un arreglo de 5 horquillas. Paralelamente el agua geotérmica con una temperatura natural de 220°C se implementa para calentar el evaporador (IC-002) con un arreglo de 45 horquillas, el cual es alimentado por el agua de planta anteriormente acondicionado en el precalentador; en consecuencia se obtiene un vapor con una presión de 1000 Kpa alimentado la turbina TAP-001 generando 6.450,9 kW energía potencial, seguido el agua de planta posteriormente se recalienta en el intercambiador de calor IC-003 para alimentar la turbina TBP-001 generado 3.782.8Kw de energía potencial, sumando una energía total de más de 10Mw generado por la planta geotérmica, además, para generar una recirculación se implementa un condensador (IC-004) diseñado con 38 horquillas alimentado el precalentador.

Mediante los cálculos obtenidos en las tablas 12 y 8, se logra determinar la potencia de 17.26 HP para la bomba de agua de planta y 58,42 HP para la bomba de inyección obteniendo un NPSH de 2,19 m y 4,63 disponible para la bomba, con lo cual mediante las distintas curvas se logra la especificación de los diámetros impulsores dando como resultado la elección de una bomba centrífuga de 1(1/2) x 3 - 13, a 3560 rpm para el agua de planta y Bomba centrífuga de 2 x 3 - 10, a 3500 rpm para el agua de reinyección. con esto se logra la selección apropiada de la bomba comercial correspondiente a cada operación de bombeo requerida por el proceso.

9. EFICIENCIA DE LA CENTRAL DE GENERACION ELECTRICA A PARTIR DE ENERGIA GEOTERMICA

Para determinar la eficiencia de un sistema de energía eléctrica basada en energía geotérmica, se utiliza la segunda ley de la termodinámica para dicho calculo. Se aplica el concepto de energía disponible, ya que las plantas de generación eléctrica operan en una serie de procesos.

La eficiencia del ciclo térmico puede ser aplicada de forma significativa, a las plantas geotérmicas, en el caso de las plantas Flash. Sin embargo, la eficiencia térmica aun en este caso debe ser calculada solamente para evaluar el ciclo.

Tabla 17.

Energía en el ciclo térmico.

Energía	KW
QEntrada	4.1010,4
Qsalida	3.0789,4
Wtap	6.451,0
Wtbp	3.782,9
Wbomba	12,9
Wneto (KW)	
	10221,0
EFICIENCIA TÉRMICA	
	25%

Nota. Tabla 17 Energia en el ciclo térmico

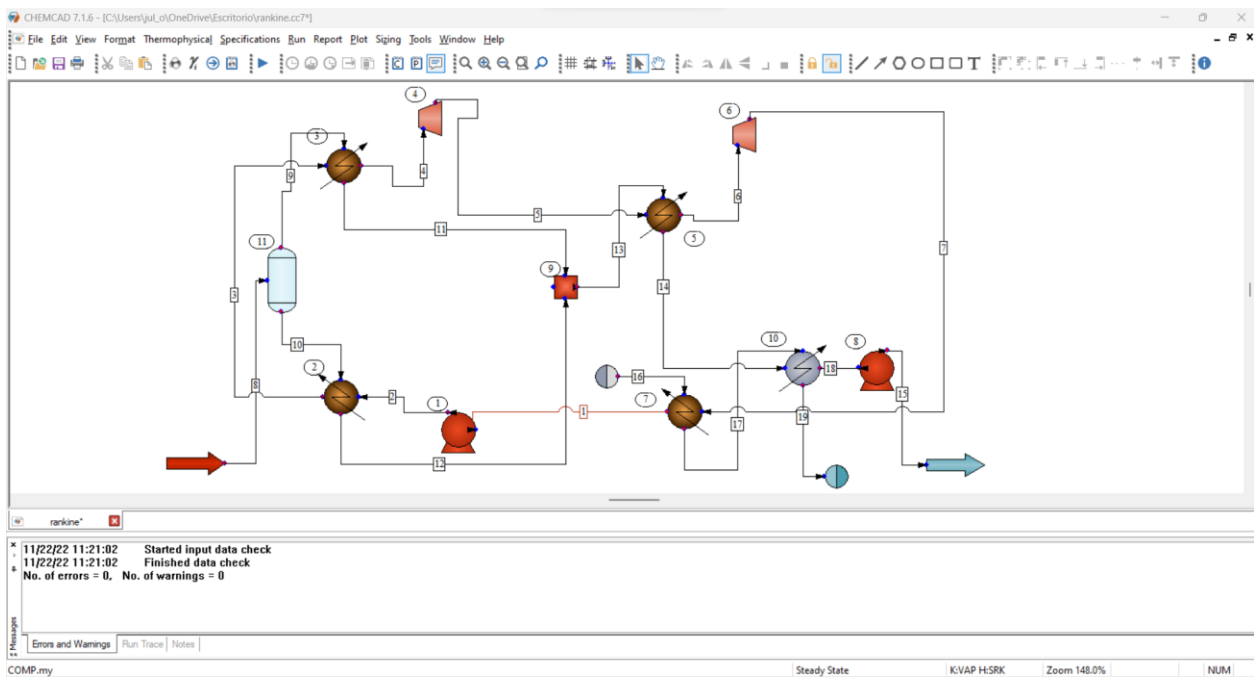
De los resultados obtenido podemos apreciar que la eficiencia energética de la planta flash es de 25% que se encuentra en un rango esperable en este tipo de plantas flash. Esto es debido a que, la diferencia de temperatura promedio entre los dos fluidos es reducida, por lo tanto, también se aplican las irreversibilidades, dando lugar a que ingrese en el ciclo más energía del reservorio geotérmico, lo que conduce a una mayor eficiencia de utilización.

10. CONDICIONES DE REINYECCION

Este proceso consiste en la devolución del recurso geotérmico extraído del reservorio geotérmico, tras haber extraído la energía de dicho fluido. Esta reinyección se da al depósito para no degradar el recurso, mejorando su vida útil y debido a la disminución de presión se lograría mejorar la extracción de energía térmica del reservorio, por lo tanto, este proceso podría mejorar la producción del depósito.

Figura 26.

Simulación Ciclo Rankine



Nota. Simulación Ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Las condiciones iniciales de extracción de del fluido geotérmico son:

Figura 27.

Condiciones de extracción

Stream No.	8
Name	- - Overall - -
Temp C	220.0000 *
Pres kPa	1554.0000 *
Enth MJ/h	6.0141E+005
Vapor mole fraction	1.000
Molar flow kmol/h	11724.2305
Mass flow kg/h	211212.0000
Std liq m3/h	211.2123
Std vap 0 C m3/h	262782.7813
Flow rates in kg/h	
Water	211212.0000

Nota. Figura 26 Condiciones de extracción en la corriente denominada 8 simulación ciclo Rankine CHEMCAD 7.1.6

Para la simulación se aumentó el flujo de extracción y se implementó el uso de para evaluar las condiciones y lograr una generación de 42498 MJ/h que equivalen a 11,8 MW.

Figura 28.

Valores Turbina 2

Specifications		Cost Estimations	
Operating mode	<input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off	ID:	6
Mode of operation:	0 Specify output pressure and efficiency		
Compressor/Expander model type:	1 Adiabatic	Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout
Pressure out	76 kPa	Performance curve unit	0 Specify head in length unit
Pressure ratio		<input type="checkbox"/> Allow negative head in compressor	
Efficiency	0.8	For multiple speed performance curves:	
Actual Power	-33999.1 MJ/h	No. of speed lines	
Property option:	Inlet conditions	Actual RPM	
Output pressure	76 kPa	Ideal Cp/Cv	1.26402
Theoretical power	-42498.9 MJ/h	Cp/Cv	1.3526
Calculated head	-26604.3 m		
Help		Cancel	OK

Nota. Figura 27 Valores Turbina 2 con entrada corriente # 6 y salida corriente 8 ciclo Rankine

Demostrando que las condiciones de reinyección ideales se logran mediante la corrección de parámetros iniciales como el flujo inicial de fluido geotérmico además de corregir la temperatura de reinyección entre unos 120 a 160 °C según la bibliografía consultada. Es por ello, que elegiremos un valor medio de 140°C como temperatura de reinyección para nuestra simulación, de esta manera tendremos cierto margen de seguridad.

Figura 29.

Condiciones de inyección

Stream No.	15
Name	
- - Overall - -	
Temp C	140.0711
Pres kPa	1554.0000
Enth MJ/h	1.2467E+005
Vapor mole fraction	0.0000
Molar flow kmol/h	11724.2305
Mass flow kg/h	211212.0000
Std liq m3/h	211.2123
Std vap 0 C m3/h	262782.7813
Flow rates in kg/h	
Water	211212.0000

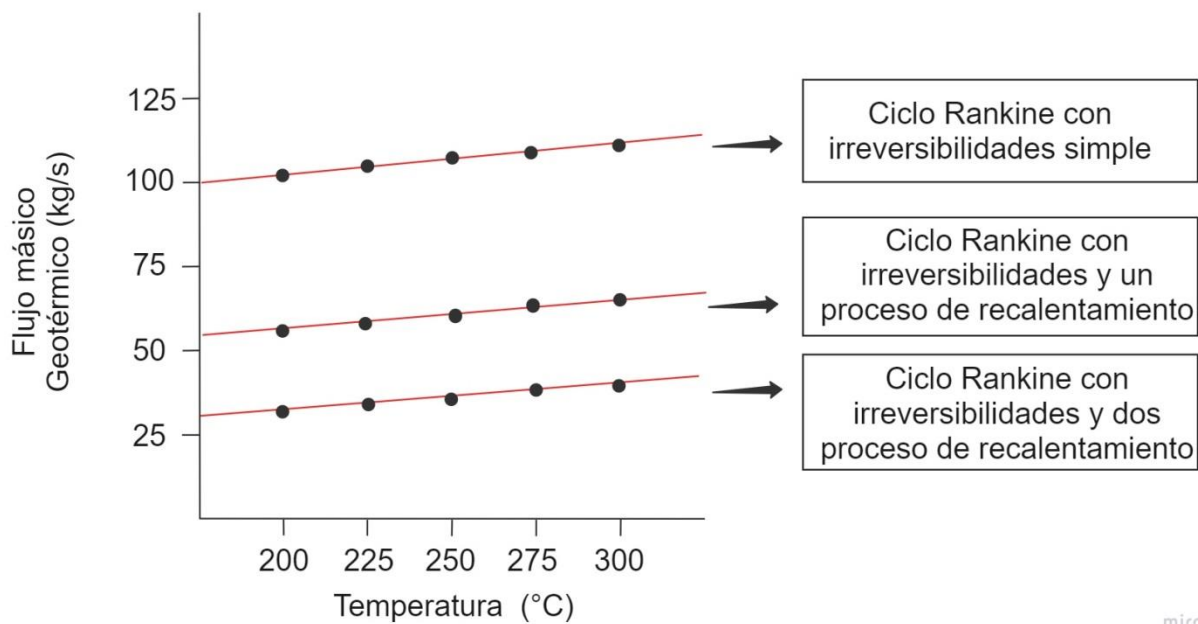
Nota. Figura 28 Condiciones de inyección corriente # 15 simulación Rankine

También se pueden emplear ciertos métodos específicos para contribuir a contrarrestar los principales problemas de la reinyección. Para reducir la tasa de precipitación elementos corrosivos se debe llevar un control del pH del fluido. Por otro lado, para retrasar el enfriamiento del pozo, es recomendable ubicar los pozos de reinyección lo suficientemente lejos de los pozos de producción, por ejemplo, a unos 2 km. Por último, se recomienda inyectar en el pozo a altas presiones.

11. FACTIBILIDAD TECNICA

Figura 30.

Gráfico comparativo de irreversibilidades



Nota. Figura 29 Gráfico comparativo de irreversibilidades temperatura (°c) vs Flujo masico geotérmico (kg/s)

La variación del flujo masico geotérmico en función de la temperatura geotérmica a diferentes temperaturas, partiendo que al perforar el pozo geotérmico se puede encontrar temperaturas desde 200 °C a 300 °C, el flujo masico ira ascendiendo de acuerdo con las temperaturas, obtendremos diferentes flujos masico totales.

Con el ciclo Rankine con irreversibilidad simple si le agregamos un proceso de recalentamiento pasara de 100 kg/s a aproximadamente 58 kg/s, por lo que al agregar otro proceso de recalentamiento el flujo geotérmico disminuye a aproximadamente 38 kg/s, por consiguiente, el desempeño de una planta geotérmica se mide que para una misma potencia al requerir menos flujo masico aumentara su eficiencia.

El diseño preliminar a una temperatura de 220°C para la temperatura del reservorio al agregar el proceso de recalentamiento se puede apreciar en la tabla 18 la disminución del flujo geotérmico [33].

Tabla 18.

Condiciones sujetas en la turbina.

	<i>Sin Proceso de recalentamiento</i>	<i>Con proceso de recalentamiento</i>
Presión de condensación (KPa)	262	80,6
Temperatura de condensación (°C)	129	95,71
Flujo másico geotérmico total (kg/s)	101,2	58,4
Flujo másico del agua de trabajo (Kg/s)	63,01	29,05
Flujo másico del sumidero (Kg/s)	51,49	214
Humedad a la salida de la turbina (%)	0	0
Eficiencia	13,14%	25%

Nota. Tabla 18 Condiciones sujetas en la turbina con procesos de recalentamiento

Un solo proceso de recalentamiento en una planta de energía geotérmica mejora la eficiencia del ciclo entre un 5 y un 10 por ciento al aumentar la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al vapor. Se pueden usar más procesos de recalentamiento, pero, la complejidad para modificar el ciclo no es práctico usar más de dos procesos de recalentamiento.

La ventaja adicional de proporcionar un vapor seco a las turbinas es la reducción de la erosión de los alabes, que permitirá además velocidades mayores en las puntas y una mayor producción de energía por turbinas sin tomar en cuenta el tipo de estas.

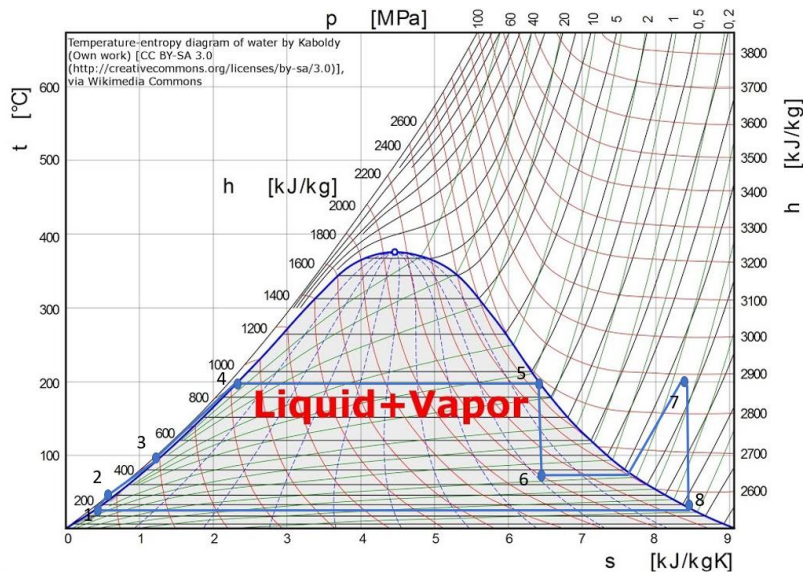
En la figura 31 se representa el cambio de temperatura en función de la entropía, se observa un aumento significativo y casi lineal entre los puntos 1, 2, 3 y 4, los cuales representan los procesos de bombeo y precalentamiento del agua del proceso. Posteriormente comienza el proceso de vaporización del agua a los 200°C, una vez vaporizada todo el agua se realiza el paso por la turbina

de alta presión, lo cual ocurre a entropía constante, lo cual se puede observar en el diagrama en los puntos 5 y 6. Seguidamente se pasa la mezcla obtenida por el recalentador para mediante el calentamiento obtener vapor sobrecalentado, el cual es pasado por la turbina de baja presión hasta obtener vapor saturado a la salida de la turbina, estos procesos se representan en el diagrama en los puntos 6, 7 y 8. El último proceso para cerrar el ciclo y volver a las condiciones iniciales es el paso por el condensador, lo cual ocurre a temperatura constante y con disminución de la entropía, dicho proceso se representa en el diagrama en los puntos 8 y 1.

Las irreversibilidades se aplican a aquellos procesos que, como la entropía, no son reversibles en el tiempo. Desde esta perspectiva termodinámica, todos los procesos naturales son irreversibles. El fenómeno de la irreversibilidad resulta del hecho de que, si un sistema termodinámico de moléculas interactivas es trasladado de un estado termodinámico a otro, ello dará como resultado que la configuración o distribución de átomos y moléculas en el seno de dicho sistema variará.

Figura 31.

Diagrama T-S del sistema



Nota. Diagrama T-S del sistema a partir de Figura 23. Esquema de la planta geotérmica de generación de 10 MW

Mediante la comparación de algunas plantas geotérmicas de vapor en el mundo, se determinó la factibilidad de la planta geotérmica ubicada en paipa-iza, Boyacá con una potencia de 10 MW

Tabla 19.*Tabla comparativa de tres plantas geotérmicas*

Planta	Valle Secolo, unidad 2	Miravalles, unidad 1	Beowawe
Localización	Larderello, Italia	Guanacaste, Costa Rica	Beowawe, Nevada
Año de inicio	1992	1994	1985
Tipo	Vapor Directo	Flash simple	Flash Doble
Potencia, MW	57	55	16,7
Salida de potencia, MW- Eficiencia	52,2	52	16
Caudal geotérmico, kg/s	111,1	759,5	157,5
Temperatura de la fuente °C	204	230	215
Eficiencia	57,6	29,5	46,7

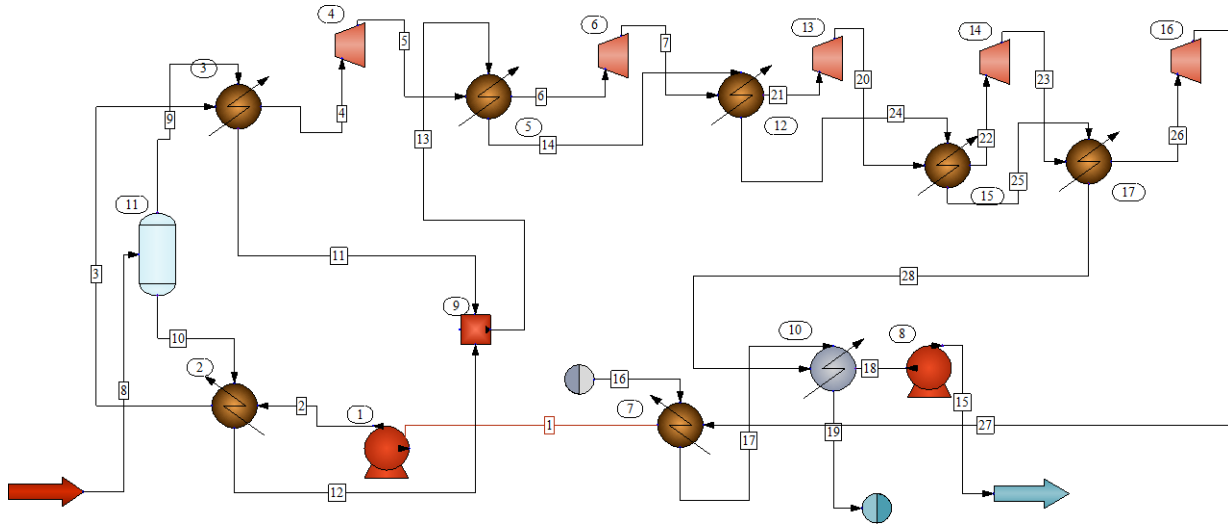
Nota. Tabla 19 Tabla comparativa de tres plantas geotérmicas con condiciones similares al diseño actual de análisis.

Por medio del uso de software de simulación CHEMCAD 7.1.6 se realizaron las simulaciones de las 3 plantas geotérmicas mencionadas anteriormente, a continuación, se presentará las variaciones en los parámetros de entrada para las respectivas simulaciones:

11.1 caso 1: Valle Secolo, unidad 2

Figura 32.

Simulación Valle Secolo, unidad 2



Nota. Simulación Ciclo Rankine valle Secolo, unidad 2 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6.

Para aprovechar una mayor cantidad de agua geotérmica, se ha aumentado la cantidad de agua de proceso y la cantidad de agua de enfriamiento, así como también, el número de turbinas, para aprovechar la cantidad y la temperatura del agua geotérmica, pues al aumentar el número de turbinas, se puede hacer una aproximación real de la disminución gradual de la presión, y reaprovechar el vapor geotérmico introduciéndolo en intercambiadores de calor, para recalentar el agua de proceso.

Figura 33.

Turbina 1A: Valle Secolo, unidad 2

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.27035	
Cp/Cv	1.34848	
Pressure out	80	kPa
Efficiency	0.9	
Actual Power	-62770.6	MJ/h
Output pressure	80	kPa
Theoretical power	-69745.1	MJ/h
Calculated head	-26678.8	m
Property option	Inlet conditions	

Nota. Turbina 1A para Ciclo Rankine valle Secolo, unidad 2 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 1A: Potencia teórica de 69745 MJ/h

Figura 34.

Turbina 2A Valle Secolo, unidad 2

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.18935	
Cp/Cv	1.42718	
Pressure out	770	kPa
Efficiency	0.9	
Actual Power	-28560.9	MJ/h
Output pressure	770	kPa
Theoretical power	-31734.3	MJ/h
Calculated head	-12244.4	m
Property option	Inlet conditions	

Nota. Turbina 2A para Ciclo Rankine valle Secolo, unidad 2 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 2A: Potencia teórica 31734,3 de MK/h

Figura 35.

Turbina 3A Valle Secolo, unidad 2

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Pressure out	400	kPa
Pressure ratio		
Efficiency	0.9	
Actual Power	-27201.8	MJ/h
Property option	Inlet conditions	
Output pressure	400	kPa
Theoretical power	-30224.3	MJ/h
Calculated head	-11758.3	m
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.22055	
Cp/Cv	1.38356	

Nota. Turbina 3A para Ciclo Rankine valle Secolo, unidad 2 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 3A: Potencia 30224 de MJ/h

Figura 36 .

Turbina 4A Valle Secolo, unidad 2

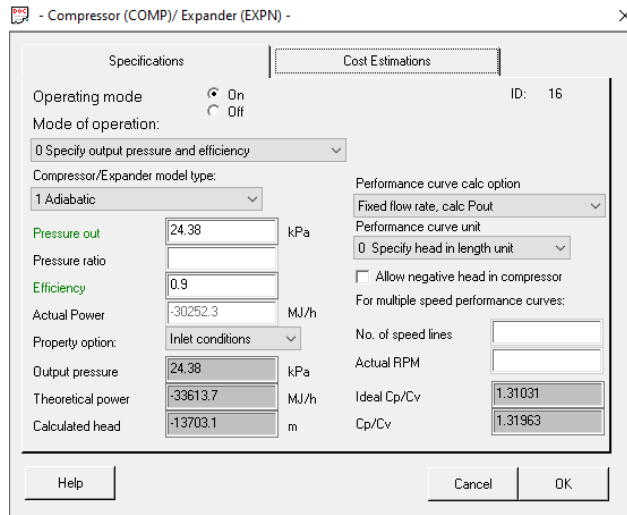
Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Pressure out	50	kPa
Pressure ratio		
Efficiency	0.9	
Actual Power	-20344.3	MJ/h
Property option	Inlet conditions	
Output pressure	50	kPa
Theoretical power	-22604.8	MJ/h
Calculated head	-9212.18	m
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.30696	
Cp/Cv	1.32196	

Nota. Turbina 4A para Ciclo Rankine valle Secolo, unidad 2 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 4A: potencia teórica de 22604,8 MJ/h

Figura 37.

Turbina 5A Valle Secolo, unidad 2



Nota. Turbina 5A para Ciclo Rankine valle Secolo, unidad 2 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 5A: potencia teórica de 33613,7 MJ/h

A partir de lo anterior:

$$69745 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 31734,3 \text{ de } \frac{\text{MK}}{\text{h}} + 30224 \text{ de } \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 22604,8 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 33613,7 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} * \frac{1}{3600\text{S}}$$

$$= 52 \text{ MW}$$

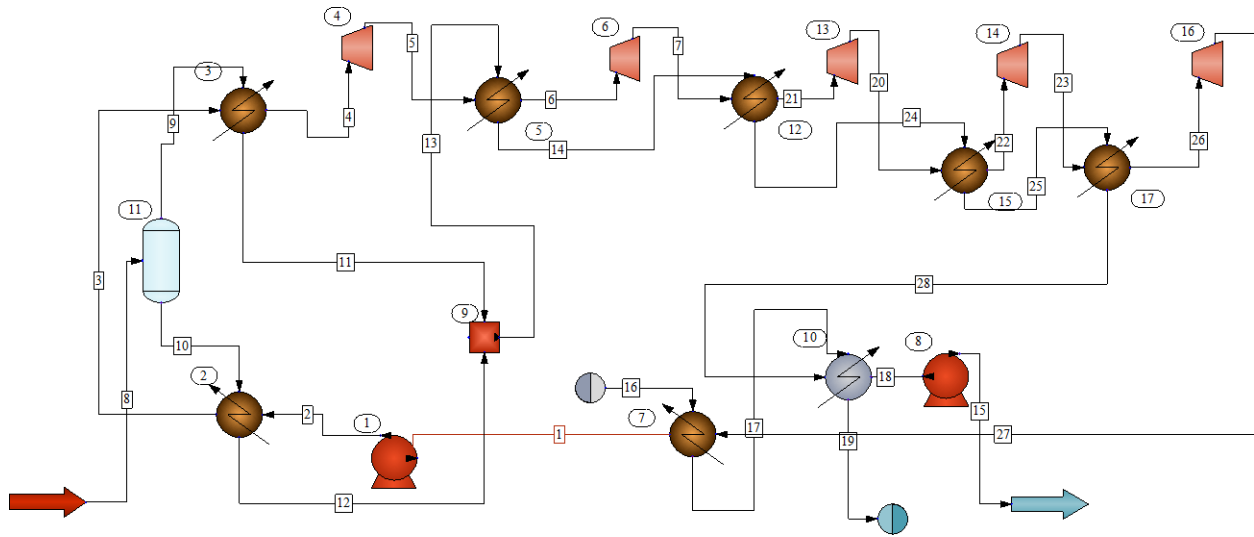
Comparando con la planta geotérmica valle secolo, larderello ubicada en Italia con potencia de 57 MW el cual necesito un caudal geotérmico de 111,1 kg/s, y aunque la diferencia de potencia sea notable, de acuerdo con la tabla 18 al agregar procesos de recalentamiento podemos llegar a aproximadamente a 30 - 38 kg/s lo cual seria 1/3 de los 111,1 kg/s usados en larderello, lo que permite realizar una comparativa respecto a esta planta que tiene una eficiencia del 52,6 %.

11.2 Caso 2: Miravalles, unidad 1

Al darse un aumento potencial del caudal geotérmico, así como también su temperatura, este contiene un poder calorífico mayor, incrementando así las temperaturas del agua de proceso para ser alimentado a las turbinas. Se incrementó la presión en el mezclador de gases, así como también se incrementó el caudal del agua de enfriamiento (río) para poder enfriar y devolver el agua geotérmica a su fuente.

Figura 38.

Simulación Miravalles, unidad 1



Nota. Simulación Ciclo Rankine Miravalles, unidad 1 para la generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

A continuación, se mostrarán los datos de las turbinas y su potencia generada:

Figura 39.

Turbina 1B Miravalles, unidad 1

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
Actual Power	-30098.9	MJ/h
Theoretical power	-33443.2	MJ/h
Calculated head	-13355.2	m
Output pressure	770	kPa
Pressure ratio	0.9	
Efficiency	0.9	
Ideal Cp/Cv	1.22653	
Cp/Cv	1.39834	

Nota. Turbina para Ciclo Rankine Miravalles, unidad 1 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 1B: Potencia teórica 33443,2 MJ/h

Figura 40.

Turbina 2B Miravalles, unidad 1

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
Actual Power	-28524.4	MJ/h
Theoretical power	-31693.7	MJ/h
Calculated head	-12744.3	m
Output pressure	400	kPa
Pressure ratio	0.9	
Efficiency	0.9	
Ideal Cp/Cv	1.25202	
Cp/Cv	1.36546	

Nota. Turbina para Ciclo Rankine Miravalles, unidad 1 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 2B: Potencia teórica de 31693,7 MJ/h

Figura 41.

Turbina 3B Miravalles, unidad 1

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.30882	
Cp/Cv	1.31556	
Pressure out	24.38	kPa
Efficiency	0.9	
Actual Power	-32205	MJ/h
Property option	Inlet conditions	
Output pressure	24.38	kPa
Theoretical power	-35783.3	MJ/h
Calculated head	-14592	m

Nota. Turbina para Ciclo Rankine Miravalles, unidad 1 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 3B: potencia de 35783 MJ/h

Figura 42.

Turbina 4B Miravalles, unidad 1

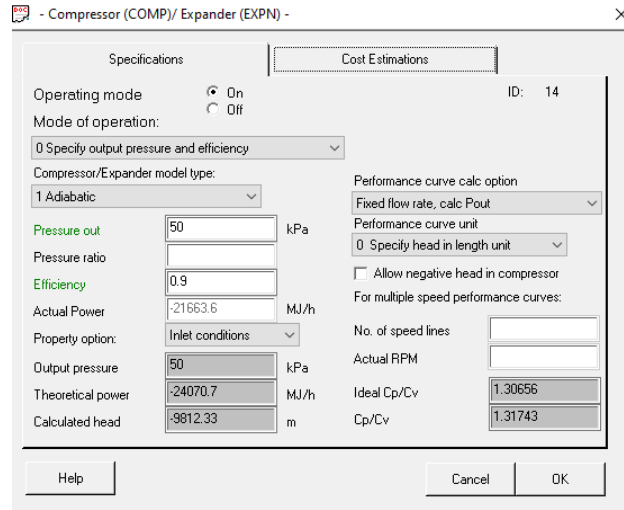
Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.28166	
Cp/Cv	1.33846	
Pressure out	80	kPa
Efficiency	0.9	
Actual Power	-65425.1	MJ/h
Property option	Inlet conditions	
Output pressure	80	kPa
Theoretical power	-72694.6	MJ/h
Calculated head	-28688	m

Nota. Turbina para Ciclo Rankine Miravalles, unidad 1 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 4B: Potencia de 72694,6 MJ/h

Figura 43.

Turbina 5B Miravalles, unidad 1



Nota. Turbina para Ciclo Rankine Miravalles, unidad 1 para le generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 5B: potencia teórica de 24,070 MJ/h

A partir de estos datos:

$$33443,2 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 31693,7 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 35783 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 72694,6 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} + 24,070 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} * \frac{1}{3600\text{S}} = 54\text{MW}$$

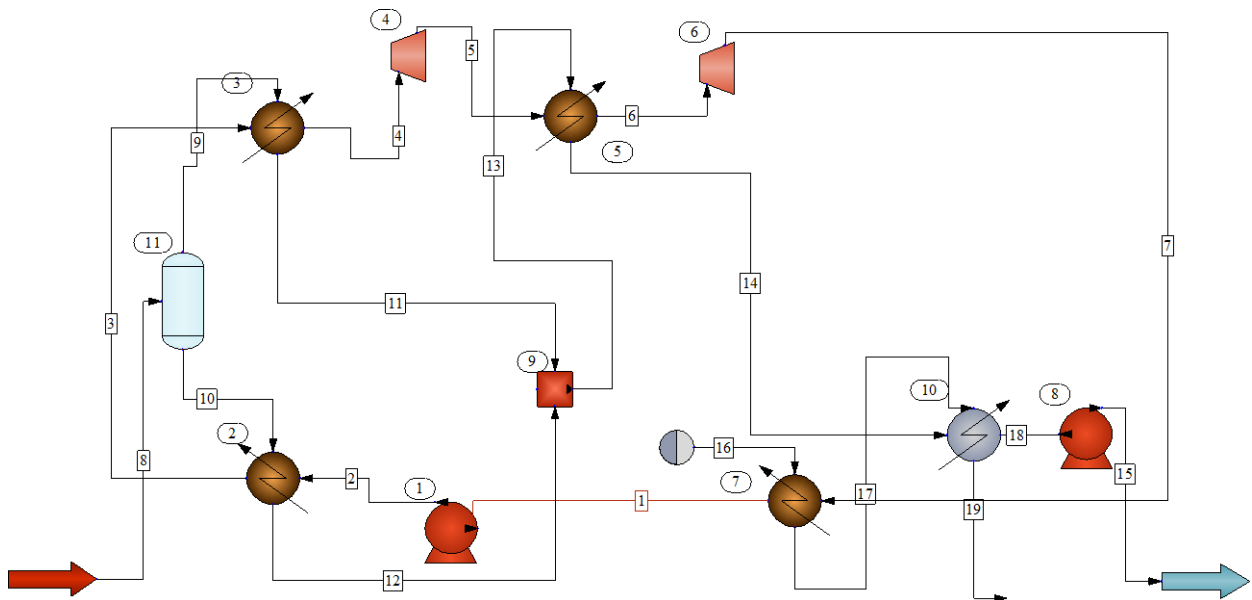
Como segunda comparativa tenemos la planta geotérmica Miravalles, guanacaste ubicado en Costa Rica, que genera 55 MW de potencia utiliza una caudal geotérmico de 759,5 kg/s con una eficiencia de 29,5 % demostrando que, al requerir un caudal geotérmico mayor, aunque produzca potencias similares afectaría la eficiencia de la planta.

11.3 caso 3: Beowawe

Al disminuir el caudal geotérmico, y reducir la proyección de la potencia que se requiere generar, dos turbinas entonces son suficientes. Se redujo el número de turbinas, así como el caudal del agua de enfriamiento (río) para enfriar el vapor geotérmico y así poder devolverlo a su fuente.

Figura 44.

Simulación Beowawe



Nota. Simulación Ciclo Rankine Beowawe para la generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

A continuación, se mostrarán los datos de las turbinas y su potencia generada:

Figura 45.

Turbina 1C Beowawe

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.20727	
Cp/Cv	1.41577	
Actual Power	-27438	MJ/h
Output pressure	800	kPa
Theoretical power	-30486.7	MJ/h
Calculated head	-11994	m

Nota. Turbina para Ciclo Rankine Beowawe para la generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 1C: potencia teorica de 30486,7 MJ/h

Figura 46.

Turbina 2C Beowawe

Parameter	Value	Unit
Operating mode	On	
Mode of operation	0 Specify output pressure and efficiency	
Compressor/Expander model type	1 Adiabatic	
Performance curve calc option	Fixed flow rate, calc Pout	
Performance curve unit	0 Specify head in length unit	
Allow negative head in compressor	<input type="checkbox"/>	
No. of speed lines		
Actual RPM		
Ideal Cp/Cv	1.24958	
Cp/Cv	1.36779	
Actual Power	-24476.5	MJ/h
Output pressure	458	kPa
Theoretical power	-27196.1	MJ/h
Calculated head	-10966.4	m

Nota. Turbina para Ciclo Rankine Beowawe para la generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico con CHEMCAD 7.1.6

Turbina 2C: potencia teorica de 27196 MJ/h

A partir de estos datos:

$$30486,7 \frac{MJ}{h} + 27196 \frac{MJ}{h} * \frac{1}{3600S} = 16MW$$

Como tercera comparativa tenemos la planta geotérmica Beowawe, nevada ubicada en Estados Unidos que genera 16,7 MW de potencia y utiliza una caudal geotérmico de 157 Kg/s, esta última tiene los valores más cercanos a nuestro diseño actual y de acuerdo con los diseños anteriores la viabilidad queda demostrada en la cantidad de procesos de recalentamiento aplicados ya que esta última iguala la eficiencia en nuestro diseño, demostrando así la factibilidad técnica para una planta geotérmica ubicada en Paipa-iza, Boyacá.

La eficiencia del ciclo es la energía que se obtuvo entre la energía máxima que se puede obtener en condiciones ideales, se da por:

$$Eficiencia\ del\ ciclo: \frac{10221\ kW}{2847,3\ \frac{KJ}{KG} * 28.26\ \frac{Kg}{s}} * 100\% = 12,7\%$$

12. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad de la generación de energía eléctrica utilizando recursos geotérmicos de nuestro país en el área geotérmica de Paipa (Boyacá) bajo los estudios y la revisión bibliográfica a partir de la prefactibilidad.

Se cumplió con el objetivo de diseñar un sistema de generación de vapor limpio utilizando calor del reservorio denominado formación une con el fin de evaluar su eficiencia y uso a futuro.

Se logro diseñar las turbinas de vapor para generación eléctrica de alta y baja presión con una potencia instalada de 10 MW o más a partir del recurso geotérmico existente

Tras el análisis de la simulación se demostró las condiciones óptimas para evitar la degradación del recurso a partir de la reinyección del fluido geotermal en el yacimiento

La eficiencia energética de la planta flash aumenta debido a los procesos de recalentamiento, debido a que da un mejor aprovechamiento del fluido geotérmico

Uno de los puntos fuertes de las plantas de generación eléctrica con recursos geotérmicos es el poder acceder a regiones montañosas, en este caso en la zona del alto de los volcanes donde no es viable transportar energía.

Finalmente, la energía geotérmica se encuentra despertando el interés en Latinoamérica ya que muchos proyectos se encuentran en fase de prefactibilidad dando así las bases para el diseño de futuros proyectos y la posibilidad de ser usada disminuyendo la centralización de energías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Martinez, M. Rojas, J. Garcia, J. Martínez y R. Rodríguez, "Informe de proyección de Demanda de Energéticos", Bogota, octubre de 2021. Accedido el 5 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia>
- [2] O. Edenhofer, R. Madruga y Y. Sokona, "Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático", Michael Melford/National Geographic Stock, junio de 2011. Accedido el 7 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_es-1.pdf
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), "Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático ", en Kyoto, Japon, 8 de diciembre de 1997. 1997, p. 31. Accedido el 7 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://unfccc.int/es/node/2409>
- [4] A. Hernández. "Panorama de la situación energética en América Latina | Heinrich Böll Stiftung | Bogotá office - Colombia". Heinrich-Böll-Stiftung. <https://co.boell.org/es/2020/04/15/panorama-de-la-situacion-energetica-en-america-latina> (accedido el 7 de agosto de 2022).
- [5] Metropolitana Valle de Aburrá. "Energías Renovables". Área Metropolitana. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx> (accedido el 9 de agosto de 2022).
- [6] M. Nemzer, A. Carter y K. Nemzer. "Geothermal Education Office - Geothermal Energy". Geothermal Education Office. <http://geothermaleducation.org/geoenergy.html> (accedido el 11 de agosto de 2022).
- [7] V. Mellado, "Energía Geotérmica: Principales usos", Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/ BCN, vol. 1, n.º 122869, p. 13, diciembre de 2019. Accedido el 11 de agosto de 2022.[Enlínea].Disponible: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/28130/2/BCN_Energia_Geotermica_principales_usos_definitivo.pdf

- [8] Instituto Geológico y Minero de España. IGME. Instituto Geológico y Minero de España. Web Site Oficial España. <https://www.igme.es/geotermia/presentacion.htm> (accedido el 11 de agosto de 2022).
- [9] G. Llopis y V. Rodrigo, "Guía de la Energía Geotérmica Guía de la Energía Geotérmica", Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid., vol. 1, p. 178, 2019. Accedido el 11 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2008/01/Guia-de-la-Energia-Geotermica-fenercom-2008.pdf>
- [10] C. porras, "Mecanismo de desarrollo limpio aplicado a la generación de energía eléctrica , con la utilización de energía geotérmica de baja entalpia en campos de producción petrolera de Apiay, Suria y capo estela (departamento del Meta Colombia).", Tesis de magister, Universidad de la sabana, Bogotá, D.C, 2010.
- [11] Capítulo 10 - Magmas - Elementos Básicos De Petrología Ignea - Miscelanea 18 - INSUGEO".: INSUGEO: Instituto Superior de Correlación Geológica: CONICET - UNT: Tucumán, Argentina. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/10.htm (accedido el 13 de noviembre de 2022)
- [12] ¿Qué es un yacimiento geotérmico? Tipos de yacimientos geotérmicos. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya". Inicia. Instituto Cartográfica y Geológica de Catalunya. <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-Tipos-de-yacimientos-geotermicos> (accedido el 13 de agosto de 2022).
- [13] A. Yunus, M.A Boles, "Termodinámica", Ed. McGraw-Hill, (2015) p. 146-150 (accedido el 13 de agosto de 2022).
- [14] J. Sanchez Guzman, L. Sanz Lopez, and L. Ocaña Robles, "Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020," 2011. Accedido el 15 de agosto de 2022

- [15] M. Pereyra, A. Mora, A. Bonilla y R. Leyte, "Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos", DYNA, diciembre de 2017, art. n.º 84(203). Accedido el 15 de agosto de 2022
- [16] F. Vélez, F. Chejne, y Quijano, A., "Thermodynamic analysis of R134a in an organic rankine cycle for power generation from low temperature sources". DYNA, 81(185), pp. 153-159, 2014. Accedido el 15 de agosto de 2022 [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532014000300021
- [17] A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 149, n.º 9, pp. 3059–3067, 210. Accedido el 18 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110001863>
- [18] C. Robilliard, "Generación de electricidad a partir de energía geotérmica", Ingeniería Industrial, n.º 29, 2009, art. n.º 27. Accedido el 18 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428493011>
- [19] J. Mendoza, "Central de generacion geotermica", trabajo de grado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2014 pp. 40–56. Accedido el 18 de agosto de 2022
- [20] R. DiPippo, Geothermal Power Plants, 4a ed. Massachusetts, 2015. Accedido el 18 de agosto del 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081008799000082?via=ihub>
- [21] J. Roca. "Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo- El Periódico de la Energía". El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/> (accedido el 20 de agosto de 2022).
- [22] O. Camacho, "Anatomía Geológica de Colombia", vol. 1, 2013, art. n.º e216. Accedido el 24 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/03ana.pdf>
- [23] Colparques. "Volcan Azufreal Chaitan". Organización Col parques. <http://www.colparques.net/AZUFREAL#aceptar> (accedido el 24 de agosto de 2022).

- [24] M. Coviello, "Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional "Tufiño-ChilesCerro Negro"", 23 de julio de 2000, Proyecto OLADE, Bogota, D.C, colombia. Accedido el 24 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/31473/S006540_es.pdf?sequence=1&mp:isAllowed=y
- [25] D. Gomez, "Modelo geotermico de Paipa mediante exploracion del subsuelo y analisis fisico-quimico de aguas termales", Tesis de magister, Universidad pedagogica y tecnologica de Colombia, Tunja, 2019. Accedido el 25 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uptc.edu.co>
- [26] J. D. Martinez. "Proyecto geotérmico del Valle de Nereidas desarrollado entre la UAM y la CHEC | Universidad Autonoma de Manizales". Universidad Autónoma de Manizales | UAM. <https://www.autonoma.edu.co/blog/noticias/asi-va-el-proyecto-geotermico-del-valle-de-nereidas-desarrollado-entre-la-uam-y-la> (accedido el 26 de agosto de 2022).
- [27] C. M. Alfaro Valero y J. Bernardo Rueda, Sistema geotérmico hidrotermal de Paipa. Bogota, D.C: Imprenta nacional de colombia, 2018. Accedido el 26 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/4>
- [28] D. Rojas, "Contribucion al estudio del volcan de Paipa y su sistema termal mediante prospecciones de resistividad.", Magister en Ciencias-Fisica, Universidad de los Andes, Bogota, D.C, 2016. Accedido el 4 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/13509/u722646.pdf?sequence=1>
- [29] M. S. Castillo Monsalve, "Tipologia de fallas en generadores hidraulicos de la empresa energia del pacifico", Trabajo de grado, Universidad del valle, Santiago de cali, 2016. Accedido el 15 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/10392/CB-0539959.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [30] S. P. Burbano Rojas, "Diseño de un modulo de intercambiador de calor de tubos y corazas", Trabajo de grado, Universidad Santo tomas, Bogota, D.C, 2014. Accedido el 16 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible:

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/719/Diseno%20de%20un%20modulo%20de%20intercambiador%20de%20calor%20de%20coraza%20y%20tubos.pdf?sequence=1>

- [31] R.E, Curran, “Solid Particle Erosion Turbulent Design and Materials, Technica”, Report No. CS-3178, EPRI, Palo Alto, USA, 1983. Accedido el 18 de septiembre de 2022 [En línea]. Disponible: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21438586>
- [32] K. Sierra Doroteo, "Diseño y construcción de un separador de flujos para un ciclo de generación geotermoelectrica", Trabajo de grado, Universidad Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 2014. Accedido el 20 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5871/Tesis.pdf?sequence=2>
- [33] L. Rybach y C. Muffler, “Geothermal Power plants, 2nd edition principal Applications, case studies and Environmental Impact”, Usa, 2005 Accedido el 30 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.elsevier.com/books/geothermal-power-plants/dipippo/978-0-7506-8620-4>

ANEXO 1

RECOMENDACIONES

Si bien este trabajo define los elementos básicos para el desarrollo de un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de un recurso geotérmico, el campo del uso directo de la energía geotérmica puede servir como puerta de entrada a proyectos de mayor escala en zonas donde se haya estimado el posible uso de un recurso geotérmico.

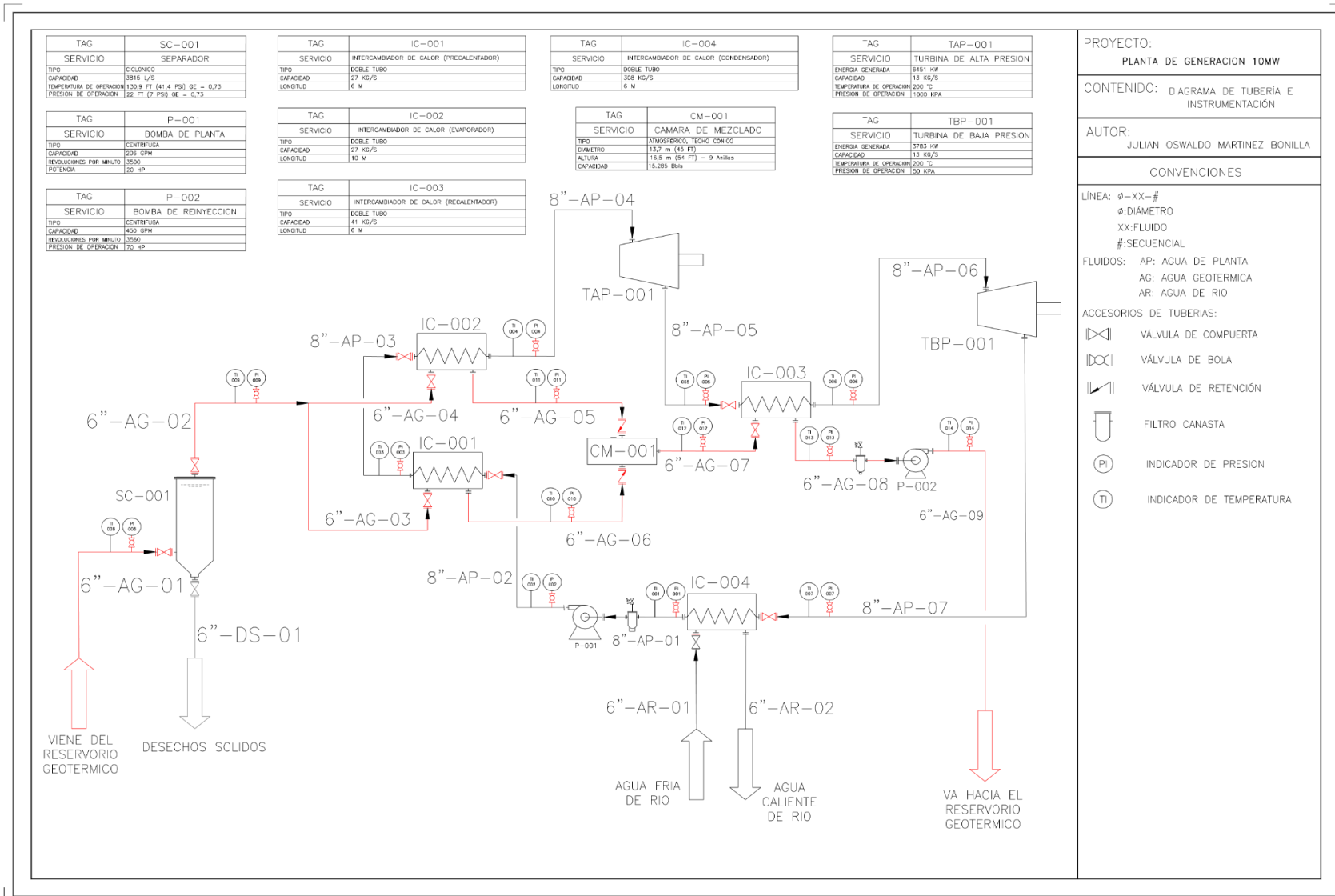
Con esto respecto a las demás regiones del país que posiblemente cuente con un recurso geotérmico, es necesario realizar los estudios previos y específicos para esa zona en particular.

Se sugiere buscar entidades encargadas del licenciamiento para así dar una mejor articulación y mejorar la eficiencia de los procesos y diseños, ya que existen entes gubernamentales que promueven el uso de energías renovables no convencionales de forma que la preparación no solo se limite al campo investigativo sino al operativo y ejecutivo con el estado.

Es importante prestar atención al proceso educativo de tal forma que se genere un proceso de apropiación por parte de la comunidad logrando aceptación social y promoviendo el uso de energía geotérmica para generación de electricidad.

El uso adecuado de los recursos geotérmicos puede contribuir al desarrollo de energía sostenible en todas las dimensiones ya que el desarrollo de la energía geotérmica está íntimamente relacionado con la sostenibilidad no solo a nivel regional, territorial sino global.

ANEXOS 2.



PLANO 2

