

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGIA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**Efecto de la presión de expansión en la generación de potencia
en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de
Covire, Tacna.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

AUTORES:

Bach. Loyola Espinoza, Piero Abimelec
Código N° 0201411021
Bach. Llaury Blas, Álvaro Cristian
Código N° 0200311046

ASESOR:

Dr. Mariños Castillo, Gualberto Antenor
DNI 17890841
Código ORCID: 0000-0001-7514-9908

Nuevo Chimbote-Perú

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGIA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento a los objetivos propuestos y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado con las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D: N°580-2022-CU-R-UNS) según la denominación siguiente

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN
ENERGÍA**

**Efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una
Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna.**

Autores

Bach. Loyola Espinoza, Piero Abimelec
Bach. Llaury Blas, Álvaro Cristian

Código N° 0201411021
Código N° 0200311046

Dr. Mariños Castillo, Gualberto Antenor
DNI 17890841
Código ORCID: 0000-0001-7514-9908



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA E.P. INGENIERÍA EN ENERGÍA

ACTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente jurado evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al reglamento General para obtener el grado Académico de Bachiller y Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D N°580-2022-CU-R-UNS); titulado:

Efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna.

Autores:

Bach. Loyola Espinoza, Piero Abimelec
Bach. Llaury Blas, Álvaro Cristian

Código N° 0201411021
Código N° 0200311046

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador.

Dr. Lujan Guevara, Gilmer Juan
Presidente

DNI 32823443

Código ORCID: 0000-0003-4619-3795

Dr. Rojas Flores, Amancio Ramiro
Secretario

DNI 32806031

Código ORCID: 0000-0003-4897-7585

Dr. Mariños Castillo, Gualberto Antenor
Integrante

DNI 17890841

Código ORCID: 0000-0001-7514-9908



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las diez horas del día jueves 28 de mayo del año dos mil veintiseis, en el Aula E-4 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, y en cumplimiento de lo establecido en el Artículo 68° del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado mediante Resolución N.° 337-2024-CU-R-UNS de fecha 12 de abril de 2024, se dio inicio a la sesión de sustentación, instalándose el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 811-2025-UNS-CFI** de fecha 19 de diciembre de 2025, conformado por los siguientes docentes:

- **Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara** **Presidente**
- **Dr. Amancio Ramiro Rojas Flores** **Secretario**
- **Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo** **Integrante**
- **M.Sc. Hugo Orlando Calderón Torres** **Accesitario**

Y según la **Resolución Decanal N.° 210-2026-UNS-FI** de fecha 25 de mayo del 2026, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de Tesis, titulada: **"EFECTO DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN LA GENERACIÓN DE POTENCIA EN UNA CENTRAL GEOTÉRMICA DE DESTELLO PARA EL YACIMIENTO COVIRE-TACNA"**, presentada por los bachilleres: **LOYOLA ESPINOZA PIERO ABIMELEC**, con código de matrícula N° 0201411021 y **LLAURY BLAS ALVARO CRISTIAN**, con código de matrícula N° 0200311046, bajo la asesoría del **Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo**, según Resolución Decanal N.° 083-2025-UNS-FI de fecha 24 de marzo de 2025.

Concluida la exposición, de los bachilleres absolvió las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y por el público asistente.

Acto seguido, el Jurado Evaluador deliberó sobre los aspectos relacionados con el contenido, desarrollo y exposición del trabajo, formulando las observaciones y recomendaciones pertinentes. En concordancia con lo establecido en el Artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, el Jurado acuerda declarar:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
LOYOLA ESPINOZA PIERO ABIMELEC	18	BUENO

Siendo las 11:00 am. del mismo día, se dio por concluida la sesión, firmando los miembros del Jurado en señal de conformidad.

Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara
PRESIDENTE

Dr. Amancio Ramiro Rojas Flores
SECRETARIO

Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo
INTEGRANTE



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las diez horas del día jueves 28 de mayo del año dos mil veintiseis, en el Aula E-4 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, y en cumplimiento de lo establecido en el Artículo 68° del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado mediante Resolución N.° 337-2024-CU-R-UNS de fecha 12 de abril de 2024, se dio inicio a la sesión de sustentación, instalándose el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 811-2025-UNS-CFI** de fecha 19 de diciembre de 2025, conformado por los siguientes docentes:

- **Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara** **Presidente**
- **Dr. Amancio Ramiro Rojas Flores** **Secretario**
- **Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo** **Integrante**
- **M.Sc. Hugo Orlando Calderón Torres** **Accesitario**

Y según la **Resolución Decanal N.° 210-2026-UNS-FI** de fecha 25 de mayo del 2026, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de Tesis, titulada: **"EFECTO DE LA PRESIÓN DE EXPANSIÓN EN LA GENERACIÓN DE POTENCIA EN UNA CENTRAL GEOTÉRMICA DE DESTELLO PARA EL YACIMIENTO COVIRE-TACNA"**, presentada por los bachilleres: **LOYOLA ESPINOZA PIERO ABIMELEC**, con código de matrícula N° 0201411021 y **LLAURY BLAS ALVARO CRISTIAN**, con código de matrícula N° 0200311046, bajo la asesoría del **Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo**, según Resolución Decanal N.° 083-2025-UNS-FI de fecha 24 de marzo de 2025.

Concluida la exposición, de los bachilleres absolvió las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y por el público asistente.

Acto seguido, el Jurado Evaluador deliberó sobre los aspectos relacionados con el contenido, desarrollo y exposición del trabajo, formulando las observaciones y recomendaciones pertinentes.

En concordancia con lo establecido en el Artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, el Jurado acuerda declarar:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
LLAURY BLAS ALVARO CRISTIAN	18	BUENO

Siendo las 11:00 am. del mismo día, se dio por concluida la sesión, firmando los miembros del Jurado en señal de conformidad.

Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara
PRESIDENTE

Dr. Amancio Ramiro Rojas Flores
SECRETARIO

Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Piero Loyola Espinoza
Título del ejercicio: REVISIONES
Título de la entrega: Efecto de la presión de expansión en la generación de potenci...
Nombre del archivo: TESIS_LOYOLA_YAURI.pdf
Tamaño del archivo: 2.29M
Total páginas: 124
Total de palabras: 45,488
Total de caracteres: 188,099
Fecha de entrega: 01-jun-2026 05:18p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2906174127



Efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna.

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	14%	1%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	4%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	docplayer.es Fuente de Internet	1%
4	revistas.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
5	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	nanopdf.com Fuente de Internet	1%
7	epage.pub Fuente de Internet	1%
8	www.scribd.com Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A Dios, con profundo amor, respeto y gratitud, dedico este logro.

A mis padres Luis Walter Loyola Ipanaque
Y Dora Marilú Espinoza Ortega, por ser el pilar fundamental en mi vida
y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso
académico. Gracias por sus enseñanzas, valores y sacrificios, que han
sido esenciales para alcanzar este logro.

Su esfuerzo constante, su confianza en mí y su ejemplo de
perseverancia han sido la motivación que me impulsó a seguir
adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este trabajo no solo
representa un objetivo cumplido, sino también el fruto de todo lo que
me han inculcado.

P.A.L.E

DEDICATORIA

A Dios con profunda gratitud y cariño.

A mis padres, por su amor incondicional, su paciencia y su constante apoyo en cada etapa de mi formación. Gracias por creer en mí, por motivarme a superarme día a día y por ser el ejemplo de esfuerzo y dedicación que guía mi camino.

Todo lo que soy hoy es reflejo de los valores que me han inculcado y del sacrificio que han realizado para brindarme las oportunidades necesarias. Este logro también les pertenece, porque sin ustedes no habría sido posible alcanzarlo.

A.C.LL. B

RECONOCIMIENTO

Expreso mi reconocimiento a mis compañeros de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Energía, por su apoyo, compañerismo y por los momentos compartidos a lo largo de esta etapa.

Asimismo, agradezco a mi asesor por su orientación y valioso acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

De igual manera, reconozco a mis compañeros de trabajo por su comprensión y apoyo constante, los cuales han sido fundamentales para culminar este logro.

P.A.L.E

RECONOCIMIENTO

Mi sincero reconocimiento a mis compañeros de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Energía, por el apoyo brindado y la colaboración compartida durante nuestra formación profesional.

De igual manera, agradezco a mi asesor por su guía, dedicación y aportes en el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, expreso mi gratitud a mis compañeros de trabajo por su comprensión y respaldo constante a lo largo de este proceso.

Atentamente,

A.C.LL.B

INDICE GENERAL

Índice

Resumen

I.	Introducción.	1
1.1	Descripción y formulación del problema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Hipótesis	2
1.4	Justificación e importancia	3
II.	Marco teórico.	4
2.1	Antecedentes.	4
2.2	Marco conceptual	6
2.2.1	Sistemas geotérmicos	6
2.2.2	Clasificación de los yacimientos geotérmicos	11
2.2.3	Centrales geotérmicas de expansión o destello	17
2.2.4	Proceso de expansión	27
2.2.5	Componentes principales	33
2.2.6	Costos nivelados de generación	41
III.	Metodología	45
3.1	Método	45
3.2	Diseño de la investigación	45
3.3	Población y muestra	45
3.4	Operacionalización de las variables	48
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	49
3.6	Procedimiento o forma de tratamiento de la información	50
3.7	Técnicas de análisis de resultados	56
IV.	Resultados y discusión	58
4.1	Estimación de presión intermedia	58
4.2	Evaluación de una central geotérmica de destello de expansión simple	61
4.3	Evaluación de una central geotérmica de destello de expansión doble	67
4.4	Evaluación económica	80
4.5	Discusión de resultados	83
V.	Conclusiones y recomendaciones	86
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones	88
VI.	Referencias bibliográficas	89
VII.	Anexos	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gradiente geotérmico	7
Figura 2 Esquema hidrogeológico conceptual del área de estudio Casiri Kallapuma-Tacna	11
Figura 3 Esquema geotérmico de alta entalpia	12
Figura 4 Esquema geotérmico de baja entalpia	15
Figura 5 Esquema de un yacimiento geotérmico de roca seca caliente. HWR	16
Figura 6 Esquema de una central de doble flash	18
Figura 7 Diagrama T vs S de central geotérmica de expansión simple	20
Figura 8 Esquema de generación de energía con central geotérmica de expansión simple	22
Figura 9 Diagrama T vs S de central geotérmica de doble expansión	25
Figura 10 Esquema de central geotérmica de doble expansión	26
Figura 11 Esquema de central geotérmica de triple expansión	27
Figura 12 Proceso de obtención del vapor de centello	28
Figura 13 Separador de vuelta para central geotérmica de destello	30
Figura 14 Separador en línea para central geotérmica de destello	31
Figura 15 Separador horizontal para central geotérmica de destello	32
Figura 16 Separador ciclónico para central geotérmica de destello	33
Figura 17 Esquema de un pozo productor.	34
Figura 18 Silenciador fotoacústico de Peerless	35
Figura 19 Separador de humedad de la compañía TLV	36
Figura 20 Sección de turbina de condensación GE sin extracción de baja potencia	38
Figura 21 Condensador a contracorriente de tipo Spray	41
Figura 22 Mapa de ubicación del área de estudio-Yacimiento geotérmico de Covire	47
Figura 23 Distribución de componentes de central geotérmica de destello de única Expansión	51
Figura 24 Distribución de componentes de central geotérmica de destello de doble Expansión	54
Figura 25 Resultados de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión simple	64
Figura 26 Resultados finales de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión simple	65
Figura 27 Relación de aprovechamiento del agua geotermal según la presión de	

expansión en el tanque flash	66
Figura 28 Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 6 y 8 bar.	72
Figura 29 Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 10 y 12 bar	73
Figura 30 Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 10 y 12 bar	74
Figura 31 Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 18 y 20 bar	75
Figura 32 Resultados finales de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de 0,5 bar de la turbina de vapor	76
Figura 33 Aprovechamiento del agua geotermal para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión con presión de descarga de 0,5 bar en la turbina de vapor	77
Figura 34 Resultados finales de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de 1 bar de la turbina de vapor	78
Figura 35 Aprovechamiento del agua geotermal para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión con presión de descarga de 1 bar en la turbina de vapor	79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valor del LCOE según diversas fuentes internacionales	44
Tabla 2 Valor del LCOE para países donde se cuenta con centrales geotérmicas de destello.	56
Tabla 3 Valores obtenidos de presión para central de destello de expansión simple	63
Tabla 4 Valores obtenidos de presión para central de destello de expansión doble	67
Tabla 5 LCOE para centrales geotérmicas de destello	83

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene por título Efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna, tiene por objetivo evaluar el efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna. El trabajo de investigación es del tipo aplicado de naturaleza descriptiva. El diseño de la investigación es no experimental y de tipo longitudinal. La población es el yacimiento de Covire, Tacna. En el Perú se cuenta con un fuerte potencial de recursos geotérmicos ubicados principalmente en la zona sur del Perú, se tiene la tecnología de generación con centrales geotérmicas de destello de presión simple y doble, en este caso se evalúa el efecto de la presión intermedio en la generación de potencia efectiva. Dentro de los resultados tenemos que el recurso geotermal disponible para el yacimiento de Covire, Tacna, que incluye también el yacimiento de Ancocollo con flujo de agua geotermal de 90,44 kg/s con una temperatura media de 231,9 °C correspondiente a una presión de operación de 27 bar, así mismo las presiones de descarga de la turbina de vapor serán de 1, 0,5 y 0,1 bar. Se plantearon 19 soluciones y 43 soluciones técnicas viables para centrales de destello de expansión simple y doble respectivamente. La mayor potencia conseguida es de 7,048 MW para una presión de expansión en el 1 tanque flash es de 2 bar de presión, con un grado de aprovechamiento de 21,64% del agua geotermal. Para una presión de descarga a 0,1 y 0,5 bar de la turbina de vapor se tiene un LCOE de 98,17 U\$/MWh.

PALABRAS CLAVE: Central geotérmica, presión de expansión, potencia eléctrica.

ABSTRACT

This research project, entitled "Effect of Expansion Pressure on Power Generation in a Geothermal Flash Plant for the Covire Field, Tacna," aims to evaluate the effect of expansion pressure on power generation in a geothermal flash plant for the Covire field in Tacna. The research is applied in nature and descriptive in nature. The research design is non-experimental and longitudinal. The study population is the Covire field in Tacna. Peru has a strong potential for geothermal resources, located mainly in the southern region. Single- and double-pressure flash geothermal power plants are available for power generation; this study evaluates the effect of intermediate pressure on effective power generation. The results show that the available geothermal resource for the Covire field in Tacna, which also includes the Ancocollo field, has a geothermal water flow rate of 90.44 kg/s with an average temperature of 231.9 °C, corresponding to an operating pressure of 27 bar. The steam turbine discharge pressures will be 1, 0.5, and 0.1 bar. Nineteen and 43 viable technical solutions were proposed for single and double expansion flash turbine power plants, respectively. The highest power output achieved is 7.048 MW with an expansion pressure of 2 bar in the flash tank, representing a 21.64% utilization rate of the geothermal water. For steam turbine discharge pressures of 0.1 and 0.5 bar, the levelized cost of energy (LCOE) is US\$98.17/MWh.

KEYWORD: Geothermal power plant, expansion pressure, electrical power.

I. Introducción.

1.1 Descripción y formulación del problema.

El 25 de mayo del 2023, los directivos de Energy Development Corporation (EDC) comunicaron al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (Osinergmin), el ente regulador de las inversiones en energía y minería en el Perú, su decisión de retirarse de los estudios y proyectos que venían realizando en nuestro país. A diferencia de otras veces, en esa oportunidad la empresa tomó la decisión de dejar de invertir en el Perú en investigaciones de los yacimientos geotérmicos por aspectos políticos y de mercado, a pesar de sus avances en estimar el potencial energético e identificar las características de la tecnología a implementar. (Bermeo, 2023)

Los principales aportes de la EDC fueron identificar 16 proyectos geotérmicos en fase de exploración acerca de determinar el potencial geotérmico en la zona sur. Los estudios de la empresa arrojaron que los reservorios analizados, se estimaban en más de 40 km², duplicando en tamaño al yacimiento de la central geotérmica de Leyte, Filipinas, una de las más grandes del mundo.

Si bien es cierto existen objetivos planteados para que los Recursos energéticos renovables no convencionales se abastezcan el 20% de la matriz energética al 2040. De esta generación, la geotermia representará el 40%, con lo cual se requiere instalar 1 500 MW al 2040, para garantizar la confiabilidad del suministro. Ya que esta es la única fuente RER que presenta intermitencias en su generación, a diferencia de la central eólica que es vulnerable a la fluctuación del viento y las centrales solares que dependen de las horas sol, aun así no se ha tomado una decisión clara y objetiva por parte del MINEM de plantearse el desarrollo de la energía geotérmica en el PERU, sabiendo que esta tecnología desarrollada hace más de 60 años se presenta como una solución a la producción de energía en horas base tal como ocurre en Filipinas, Italia, Islandia y en los países de Centroamérica incluyendo a México. (Curi, 2021)

Dentro de las tecnologías geotérmicas existentes las centrales geotérmicas de destello o de expansión se han desarrollado a nivel mundial, caracterizándose por la identificación de la presión o presiones intermedias para la máxima explotación del recurso geotérmico, lo cual repercute en conseguir la máxima potencia efectiva. Cada yacimiento geotérmico presenta características particulares de su aprovechamiento, según la presión que se seleccione para una central geotérmica, cuya mala identificación puede generar inversiones excesivamente elevadas. (Bonilla et al., 2017)

En referencia a lo anterior, siendo el yacimiento de Covire de Tacna de mediana entalpia, la tecnología de destello presenta un problema que radica que al seleccionar una determinada presión intermedia esta producirá desde todo el recurso empleado, solo una fracción útil de vapor geotermal lo que repercute en la potencia eléctrica final obtenida. Ahora si aumentamos la presión de expansión, se puede obtener un mayor valor del vapor geotermal, pero esto afectara a las características de aprovechamiento en la etapa de expansión inferior de la central de destello, generándose un problema de como identificar la presión intermedia de expansión para estas centrales geotérmicas. De acuerdo a lo detallado en la realidad problemática y los antecedentes del proyecto de investigación se plantea lo siguiente:

¿Cuál es el efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna?

1.2 Objetivos:

Objetivo general

Evaluar el efecto de la presión de expansión en la generación de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna.

Objetivos específicos:

- Estimar los parámetros de presión intermedia de una central geotérmica de destello en función a la temperatura del yacimiento de Covire, Tacna.
- Evaluar el potencial de generación de energía en función a la presión de expansión en una central geotérmica de destello de expansión simple para el yacimiento de Covire, Tacna.
- Evaluar el potencial de generación de energía en función a la presión de expansión en una central geotérmica de destello de expansión doble para el yacimiento de Covire, Tacna.
- Realizar una evaluación económica de la central geotérmica de destello con la mayor potencia generada.

1.3 Formulación de la Hipótesis:

El efecto de la presión de expansión entre 15 a 10 bar permite la producción máxima de potencia en una Central Geotérmica de Destello para el yacimiento de Covire, Tacna.

1.4 Justificación e importancia:

La geotermia se caracteriza por proporcionar una generación eléctrica continua y estable durante las 24 horas, sin depender de las variaciones en los precios de los combustibles ni de las condiciones climáticas. Por ello, se considera una fuente de energía rentable, limpia y adecuada para operar como generación de base, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética. Asimismo, se trata de una tecnología ampliamente probada, capaz de alcanzar potencias superiores a los 50 MW, dependiendo de las características del recurso geotérmico disponible. De acuerdo con Curí (2021), la energía geotérmica presenta un menor impacto ambiental en comparación con otras tecnologías de base, ya que sus emisiones de CO₂ equivalente oscilan entre 59 y 396 lbs/MWh, valores significativamente inferiores a los registrados en centrales a carbón (2200 lbs/MWh) y a gas natural (861 lbs/MWh).

La tecnología de generación con centrales geotérmicas de destello (solo emplea un fluido que es el agua geotermal) permiten un mejor aprovechamiento del recurso geotermal a diferencia de las centrales geotérmicas de ciclo binario (que requieren de varios fluidos tal como el agua geotermal, refrigerante primario y refrigerante secundario) independientemente de la temperatura del yacimiento geotérmico.

Adicionalmente, el recurso geotérmico no se limita únicamente a la generación de electricidad, sino que también impulsa el desarrollo económico regional mediante su aprovechamiento directo en aplicaciones como calefacción, piscicultura, invernaderos, procesos industriales, turismo, entre otros usos.

Asimismo, la implementación de una futura central geotérmica contribuirá a la generación de empleo para la población local, promoviendo beneficios económicos tanto de manera directa como indirecta a través de actividades complementarias. Este impacto resulta especialmente relevante en contextos donde existen condiciones de pobreza y limitada atención por parte del Estado peruano en la zona de estudio.

II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes:

Se presentan los antecedentes para el informe:

Arcos, O. et al. (2017) de la Universidad ESAN en su tesis Evaluación de la Viabilidad del desarrollo Geotérmico del campo Chivay-Pinchollo en la región Arequipa para generación concluye que se ha determinado que el proyecto geotérmico en el campo Chivay-Pinchollo, con un potencial estimado de 114 MW, permitirá la instalación de una central con una capacidad de 90 MW. Desde una perspectiva privada, se estima que el desarrollo del proyecto tomará aproximadamente 7 años y requerirá una inversión de 436.9 millones de dólares. Para su financiamiento, se contempla cubrir el 70% mediante deuda a una tasa de interés del 6%, acorde con los estándares para proyectos de energías renovables, con un plazo de amortización de 12 años.

Bonilla, A. et al. (2017) de la Universidad Nacional de Colombia en su artículo de investigación Análisis paramétrico de las centrales geo termoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbrido concluyen que las centrales de energía que utilizan como fuente de energía la geotérmica, en específico vapor geotermal presentan un buen rendimiento de las centrales cuando se incorporan dos cámaras flash en su diseño. Sin embargo, añadir una tercera cámara no genera un aumento significativo en la eficiencia térmica ni en la producción de energía, ya que conlleva mayores pérdidas de disponibilidad energética en la tercera etapa de expansión dentro de la turbina de vapor. Un balance de energía en estas centrales geotérmicas evidencia que la inclusión de cámaras de expansión contribuye al incremento del trabajo mecánico durante la expansión, además de mejorar la seguridad operativa al mantener la calidad del vapor por encima de 0.88. Por lo cual una tercera cámara de expansión presenta la posibilidad de incrementar el valor de la potencia final obtenida.

Bulnes, J. (2018) de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, en su tesis Dimensionamiento y selección de una central geotérmica basada en el ciclo rankine orgánico ubicada en el Yacimiento Geotérmico Jesús María – Moquegua, concluye que tras comparar Isobutano, Pentano y R114, se determinó que el Isobutano presenta el mejor desempeño bajo las condiciones de ingreso al sistema, permitiendo una mayor generación de potencia de forma estable. Se determinó y seleccionó un caudal de trabajo de 101,1 kg/s. El rendimiento de planta resultó ser del 11,7%, un valor relativamente bajo, aunque

dentro del rango típico para las centrales de ciclo binario, que suelen presentar eficiencias entre el 8% y el 14%.

Gamarra, C. (2021) de la Universidad Católica Santo Domingo de Mogrovejo en su tesis Dimensionamiento de una central geotérmica en Moquegua de 8 MW para la Universidad Católica Santo Domingo de Mogrovejo, determino que el área de Fuente Viscachuni, presenta condiciones óptimas para la instalación de una planta geotérmica, ya que en sus profundidades alberga aguas maduras en equilibrio químico, lo que permite obtener mediciones de temperatura más precisas y estables. Se seleccionó el Isobutano como fluido de trabajo por ser el más adecuado; en comparación con el Isopentano, el Isobutano permite generar una mayor potencia eléctrica bajo las mismas condiciones. Aunque se trata de un refrigerante inflamable, destaca por sus excelentes propiedades ambientales, ya que no causa daño a la capa de ozono.

Guillen, E. & Medina, D. (2019) de la Universidad Católica Santa María en su tesis Diseño de Una Central Geotérmica de 100 MW desde la Generación de Energía Eléctrica hasta su Transmisión a la Subestación Eléctrica Montalvo de la Ciudad de Moquegua y Aprovechamiento Cogenerativo para Desarrollo Sostenible para la Universidad Católica Santa María concluyen que al realizar el diseño de una central geotérmica con una capacidad de 100 MW, en funciona las temperaturas del agua geotermal (230 °C y 250 °C) para la producción de electricidad con rendimientos de 33%. Se han identificado los parámetros de diseño de la central geotérmica, siendo la presión y la temperatura del fluido geotérmico los más relevantes para la potencia efectiva que se desea obtener.

Miranda, R. & Peralta, R. (2017) de la Universidad Nacional del Altiplano en su tesis Análisis de estudio de la energía geotérmica de las aguas termales de Putina empleando isobutano para la localidad de Putina para la Universidad Nacional del Altiplano concluyen que se identificaron 7 fuentes geotermales, en donde para la fuente geotermal de Ollachea se tiene una temperatura de 97.5 °C y para Loripongo con 57.72°C, siendo la temperatura del yacimiento el principal factor que afecta a la explotación del yacimiento.

Pérez, V. & Velásquez, J. (2024) de la Universidad Nacional del Santa en su tesis Evaluación del fluido de operación en el performance del ciclo binario mediante energía geotérmica en la Región 2 – Ancash, 2022 en la Universidad Nacional del Santa, determinaron que al modelar la Planta de Energía Geotérmica Binaria con temperatura geotérmica de 369,3 K y la influencia de la presión de operación, obteniendo mejores resultados a las siguientes presiones: 450 kPa para CB con Isopentano, 1300 kPa para CB

con Isobutano y 1000 kPa para CB con R245fa. El modelo tuvo como datos iniciales $\eta_t = 0.85$, $\eta_b = 0.80$, Pinch Point de 5 K y $m \cdot G = 100$ kg/s. Obteniendo un fluido de operación para el Isopentano, isobutano y R245fa se encuentran en 114.1 kg/s, 70.2 kg/s y 70 kg/s, respectivamente.

Pinedo, C. & Ramírez, E. (2015) de la Universidad Nacional del Santa en su tesis Análisis y evaluación del potencial geotérmico para su aprovechamiento mediante una central de ciclo binario para generación de potencia efectiva en la región Corongo – Ancash, Perú, en la Universidad Nacional del Santa concluyen que la región de Corongo cuenta con yacimientos hidrotermales caracterizados por aguas ácidas, saladas y bicarbonatadas, acompañadas de emisiones de gases como $H_2 S$ y CO_2 . Las temperaturas en superficie varían entre 16 °C y 60 °C, mientras que en el subsuelo alcanzan valores entre 180 °C y 290 °C, con un flujo másico mayor a 15 kg/s. Para este sistema se utilizó el Isopentano como fluido secundario, operando con parámetros de $T_1 = 100$ °C, $P_1 = 10$ bar y $P_2 = 0.65$ bar, debido a sus propiedades favorables, como su baja temperatura de ebullición de 28 °C y su punto de condensación por encima de 0 °C, con lo cual se alcanza un alto grado de aprovechamiento.

2.2 Marco conceptual:

2.2.1 Sistemas geotérmicos.

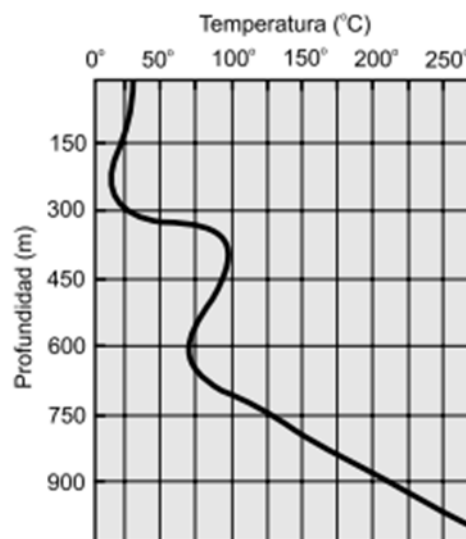
La energía interna de la Tierra procede del calor acumulado en su núcleo durante el proceso de formación del planeta (hace aproximadamente 4.600 millones de años) y, fundamentalmente, de las radiaciones emitidas por la desintegración atómica de elementos químicos radiactivos (uranio 238, torio 232, potasio 40, etc.) presentes en el interior de la misma. El calor almacenado en el interior de la Tierra no se encuentra uniformemente distribuido, sino que es más elevado en el núcleo (alrededor de 7 000 °C) y de menor intensidad en la corteza. El gradiente térmico creado, es decir, la diferencia de temperaturas existente origina un flujo de calor desde las zonas más calientes hacia las más frías de la corteza. El flujo de calor cerca de la superficie, que tiene lugar fundamentalmente por conducción, depende del gradiente térmico y de la conductividad térmica del material. (Carta, et al, 2009)

A nivel global del planeta, a medida que se profundiza en la corteza terrestre, la temperatura suele aumentar aproximadamente 3 °C cada 100 m. Sin embargo, existen

zonas de la superficie terrestre que presentan anomalías geotérmicas, originadas por la ascensión, en determinadas condiciones, de parte de material fundido de las profundidades y que queda atrapado en espacios próximos a la superficie. Por tanto, en sectores de la corteza terrestre pueden existir masas de material a gran temperatura (800 -1 000°C) que pueden dar lugar a un gradiente de temperatura entre 100 -200 °C/km. En estas zonas se dice que existen yacimientos geotérmicos, los cuales, a veces, se manifiestan en la superficie en forma de géiseres, de erupciones volcánicas, de aguas termales, etc. (Carta, et al, 2009)

Figura 1

Gradiente geotérmico



Nota. La figura representa el comportamiento del gradiente de temperaturas en función a la profundidad del yacimiento geotérmico, el gradiente se mantiene en 50°C hasta una profundidad de 300 metros.

Para describir la estructura interna de la Tierra se emplean dos enfoques: el modelo geoquímico y el modelo dinámico. Ambos permiten clasificar el interior terrestre desde la superficie hasta el núcleo, ubicado aproximadamente a 6 371 km de profundidad, considerando la composición química en el primer caso y las propiedades mecánicas, como la rigidez y plasticidad, en el segundo. De acuerdo con el modelo geoquímico, la Tierra se divide en tres capas principales: corteza, manto y núcleo. La corteza, que corresponde a la capa más externa, está formada por rocas en estado sólido. Su espesor rara vez supera los 70 km, la densidad media es cerca de 3 g/cm³ y la temperatura media

en su límite inferior es de unos 400 °C. La segunda capa, denominada manto, se halla inmediatamente debajo de la anterior. El manto terrestre se divide en dos zonas: el manto superior, que se extiende hasta aproximadamente 700 km de profundidad, con una temperatura cercana a 1 500 °C y una densidad de 3,3 g/cm³; y el manto inferior, que alcanza los 2 900 km de profundidad, con temperaturas alrededor de 3 000 °C y una densidad de 5,7 g/cm³. Los materiales que lo conforman presentan una composición mineralógica diferente a la de las rocas superficiales. A partir de los 2 900 km de profundidad comienza el núcleo, la tercera capa de la Tierra, el cual se subdivide en núcleo externo, que llega hasta los 5 100 km de profundidad, con una temperatura aproximada de 4 000 °C y una densidad de 9 g/cm³; y núcleo interno, que se extiende hasta el centro del planeta a unos 6 371 km, alcanzando temperaturas cercanas a 6 000 °C y una densidad de 12 g/cm³ (Carta et al., 2009).

El calor almacenado dentro de rocas y suelos es complicado técnicamente para ser extraído de forma directa, con lo cual tiene un elevado costo, para lo cual se requiere disponer de un fluido (agua) para transportarlo a la superficie de manera concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales o intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a baja profundidad del suelo. El fluido geotérmico o líquido caliente generalmente agua presenta un alto porcentaje en sales minerales y/o vapor. El fluido geotérmico, en función a su temperatura se destina a la generación de energía o en sistemas de calentamiento para el sector industrial, residencial, invernaderos, entre otros usos. (Sánchez, Sanz y Ocañas, 2010)

Un sistema geotérmico es un sistema convectivo en el cual el agua geotermal permanece confinada y el calor se transfiere desde una fuente térmica hacia un sumidero, generalmente localizado en una zona libre en la superficie terrestre. Este tipo de sistema consta de tres componentes esenciales: una fuente de energía térmica, un reservorio y el agua geotermal que actúa como medio para transportar la energía térmica. En algunos casos, estos sistemas pueden incluir múltiples reservorios interconectados, como ocurre en los campos geotérmicos de Mak-Ban en Filipinas y Kahara Bodas en Indonesia. (Curí, 2021)

Dado que aún no existe un consenso definitivo sobre la clasificación de los sistemas geotérmicos, se reconocen dos enfoques principales. Uno de ellos se basa en la forma en

que se transfiere la energía, dividiendo los sistemas en conductivos y convectivos. Los sistemas conductivos, caracterizados principalmente por agua geotermal caliente, presentan un flujo de agua lento que facilita la transferencia de calor. En contraste, los sistemas convectivos están dominados por vapor geotermal seco, el cual determina la distribución de presión, temperatura y el comportamiento general del sistema. Estos últimos cuentan con una fuente térmica significativa que permite el cambio de fase del fluido caliente. Según ello existen de baja entalpia (hasta 125°C de temperatura) de mediana entalpia (entre 125-225 °C de temperatura) y de alta entalpia (más de 225 °C de temperatura). (Curí, 2021)

Dentro de las manifestaciones geotérmicas tenemos:

- Volcán: Son aberturas geológicas en la corteza terrestre los cuales según su estado de actividad expulsan lava, vapor y/o cenizas con fuerza, o en forma de vertimientos a baja presión.
- Aguas geotermales: Son manantiales naturales del que brota agua más caliente superior a la ambiental. Se concentran en lagunas o en arroyos.
- Géiser: Es un surtidor intermitente de agua líquida presurizada a una temperatura entre 70 y 120 °C, la cual se expansiona al entrar en contacto con el medio ambiente, contiene con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión. Los minerales disueltos quedan depositados alrededor del géiser en forma de escoria o de sílice amorfa (geiserita). Los géiseres en muchos casos se han extinguido por causas naturales o debido a la instalación cercana de instalaciones geotérmicas. La principal concentración de géiseres se ubica en el Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, EE.UU.). (Llopis & Rodrigo, 2010)
- Fumarolas: Es el nombre designado a las emisiones de gases y vapores de agua a temperaturas muy altas, en ciertas ocasiones pueden alcanzar temperaturas cercanas a 500 °C. Está conformada por sustancias carbónicas, sulfurosas, clorhídricas, etc. Las solfataras, además de vapor de agua a 90 – 300 °C, presentan en su composición sulfuro de hidrógeno, el cual, al contacto con el aire, se oxida y deposita azufre alrededor de la abertura de la fumarola. Por otro lado, las mofetas son fumarolas de menor temperatura, de hasta 90 °C, que desprenden elevadas cantidades de anhídrido carbónico.

- Volcanes de fango (mud pots): Son erupciones de gas y barro que aparecen en zonas con escasas de agua para sostener un géiser o una fuente termal. El vapor y los gases burbujan a través del barro formado por la interacción de los gases con rocas sedimentarias. En Italia se les conoce como salsas. (Llopis & Rodrigo, 2010)

Un acuífero es una formación geológica compuesta por una o varias capas de roca que tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua. Se localiza en el subsuelo, específicamente en la denominada zona saturada. Estos sistemas se caracterizan por presentar determinados niveles de permeabilidad y porosidad, parámetros que condicionan sus propiedades hidráulicas, es decir, el movimiento del agua depende del tipo de material rocoso presente. Los acuíferos se originan a partir de la infiltración de aguas pluviales que penetran el suelo hasta encontrar capas impermeables, las cuales impiden su paso y favorecen su acumulación en los espacios porosos de las rocas subterráneas. De este modo, las precipitaciones contribuyen a la recarga natural de los acuíferos. (Carta, et al, 2009)

Para determinar la rentabilidad de un yacimiento geotérmico se debe realizar un análisis con los siguientes aspectos:

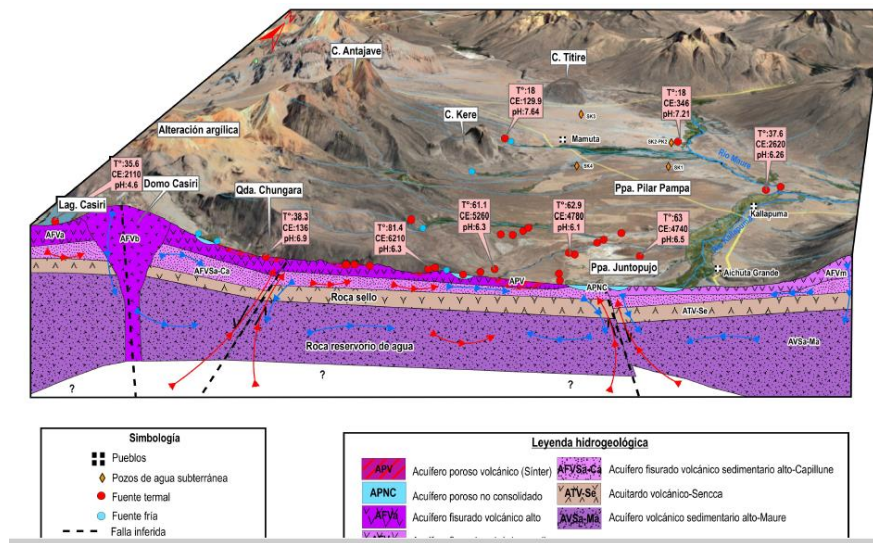
- La profundidad y espesor del acuífero.
- La calidad del fluido geotérmico, flujo masico y su temperatura.
- La permeabilidad y porosidad que tienen las rocas.
- La conductividad térmica y capacidad calorífica del acuífero y de las rocas circundante. (Carta, et al, 2009)

Del mismo la caracterización de un yacimiento geotérmico dependerá de los estudios:

- Análisis geográfico y geomorfológico.
- Caracterización ambiental e hidrológico.
- Análisis geológico.
- Estudio hidrogeológico.
- Estudio geofísico.
- Estudio geoquímico.
- Determinación del potencial geotérmico. (Carta, et al, 2009)

Figura 2

Esquema hidrogeológico conceptual del área de estudio Casiri Kallapuma-Tacna



Nota. Imagen obtenida de INGENMET Perú (2025) se observa la distribución de temperaturas en el área conformante del yacimiento geotérmico.

2.2.2 Clasificación de los yacimientos geotérmicos.

Dentro de los yacimientos geotérmicos tenemos los siguientes:

a. Yacimientos hidrotérmicos.

Los sistemas hidrotérmicos contienen agua en su interior, la cual generalmente proviene del deshielo o de las precipitaciones. Estos sistemas suelen ubicarse a profundidades que varían entre 1 km y 10 km. Según el estado en que se encuentre el fluido, se clasifican en sistemas dominados por vapor y sistemas dominados por agua líquida. Cabe destacar que estos son los únicos tipos de sistemas geotérmicos que han superado las fases de investigación y desarrollo experimental, encontrándose actualmente en etapa de explotación comercial y siendo utilizados para la generación de energía eléctrica. (Carta, et al, 2009)

En los sistemas con predominio de vapor, la entalpía —entendida como el contenido total de energía térmica del sistema— se sitúa aproximadamente en 600 kcal/kg. Asimismo, estos sistemas presentan temperaturas relativamente uniformes, que generalmente oscilan entre 150 y 400 °C. Las presiones no superaran los 5 MPa. Estas características del vapor sobrecalentado seco son apropiadas para que, una vez extraído mediante la perforación de

pozos, pueda ser utilizado para la generación de energía eléctrica con un rendimiento aceptable. (Carta, et al, 2009)

En los sistemas con predominio de agua en estado líquido, la entalpía puede variar, presentándose valores altos (entre 200 y 400 kcal/kg) o bajos. En aquellos de alta entalpía, las temperaturas suelen situarse en un rango de 180 a 300 °C, mientras que las presiones generalmente no superan 1 MPa. Cuando el fluido asciende hacia la superficie, ya sea de forma natural a través de fracturas o mediante perforaciones realizadas por el ser humano, experimenta una disminución de presión que provoca su transformación repentina en vapor. (Carta, et al, 2009)

Figura 3

Esquema geotérmico de alta entalpía



Nota. Se presenta la distribución de los principales componentes de la central geotérmica del tipo binario, la cual es una central a vapor modificada, en la cual el caldero es reemplazado por intercambiador de calor, imagen obtenida del texto Centrales con Recursos Renovables.

Sistemas geotérmicos a media temperatura o media entalpía.

Presentan temperaturas que oscilan entre 90 y 150 °C y se localizan a profundidades menores a 1000 metros, generalmente en regiones con un alto gradiente geotérmico. Este tipo de recursos se aprovecha en la generación de electricidad mediante centrales de ciclo binario, donde se emplea un fluido secundario con menor temperatura de vaporización.

Asimismo, pueden destinarse a usos térmicos, como sistemas de calefacción y refrigeración urbana, así como en diversos procesos industriales. (Miranda & Peralta, 2017)

Los Yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas entre 90 y 150 °C se encuentran en diversos lugares del planeta: en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a profundidades entre 2.000 y 4.000 m; en zonas de adelgazamiento litosférico; en zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos; o en los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta temperatura, pero a menor profundidad, menor a 1.000 m. (Miranda & Peralta, 2017)

Este tipo de yacimientos se encuentra en diversas zonas específicas donde, debido a la presencia de fallas y discontinuidades, el agua puede ascender con facilidad hasta la superficie, manifestándose a través de aguas termales. Al igual que los yacimientos de alta temperatura, requieren de una intrusión magmática que actúe como fuente de calor y de un acuífero con adecuada recarga. Sin embargo, se diferencian de estos en que no presentan una capa impermeable que permita conservar el calor y la presión dentro del reservorio. (Llopis & Rodrigo, 2010)

Sistemas geotérmicos a baja temperatura o baja entalpia.

Presentan temperaturas comprendidas entre 30 y 90 °C y se ubican generalmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades que varían entre 1 500 y 3 500 metros, o a menos de 1 000 metros en áreas donde el gradiente es más elevado. Su aprovechamiento suele requerir la existencia de una demanda cercana de energía térmica. Una de las principales fuentes de calor interno de la Tierra es la desintegración de isótopos radiactivos presentes en las rocas, cuyo aporte térmico depende de su composición química y antigüedad; por ello, los gradientes geotérmicos tienden a ser mayores en cuencas sedimentarias jóvenes. Estos recursos se emplean principalmente en sistemas de calefacción y climatización urbana, producción de agua caliente sanitaria y en diversos procesos industriales. (Expósito, 2015)

Una de las mayores fuentes de calor terrestre es la desintegración de isótopos radiactivos presentes en las rocas. Ese calor varía según la composición química y con la antigüedad de las rocas, razón por la cual, los gradientes geotérmicos son más elevados en cuencas

sedimentarias jóvenes que en zócalos antiguos. Actualmente, los edificios del Capitolio, Juzgados y 40 edificios comerciales más tienen calefacción con agua geotermal a una temperatura de unos 80 °C, que se extrae por varios pozos desde 268 – 580 m de profundidad, y se inyecta por otro pozo situado a 1,6 km al suroeste del campo de pozos en explotación. (Llopis & Rodrigo, 2010)

Sistemas geotérmicos a muy baja temperatura.

Esta referido a la energía almacenada en la corteza terrestre o aguas subterráneas a temperaturas ligeramente superiores a 30°C, ubicadas en la totalidad de la corteza terrestre del planeta. En cualquier punto se les puede captar y aprovechar esta fuente de calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo; dentro de sus aplicaciones tenemos la calefacción en casas individuales y edificios por medio de bombas de calor geotérmicas. En una profundidad entre 10- 15 m. las temperaturas del subsuelo varían según las estaciones. (Expósito, 2015)

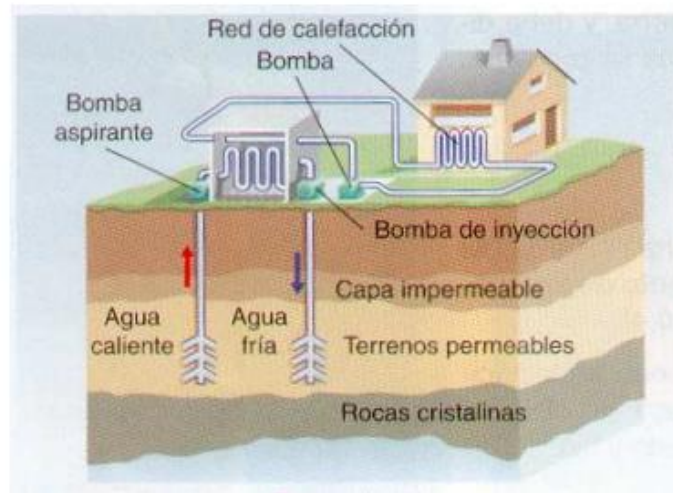
En diversos puntos de la superficie terrestre se puede realizar la captación y aprovechamiento del calor almacenado dentro de las capas superficiales del sub- suelo, a pocos metros de profundidad, o en acuíferos de baja profundidad para climatización de casas ubicadas cerca de los yacimientos, del mismo modo en invernaderos. La superficie del suelo intercambia calor con la atmósfera y sufre las variaciones constantes de temperatura hasta una profundidad de 0,5 m. A pocos metros de profundidad, la temperatura permanece relativamente estable, entre 7 y 13 °C de variación con respecto a la temperatura ambiental. Esto es producido por el calentamiento del sol sobre la corteza terrestre especialmente en meses de verano, y debido a la inercia térmica de suelos y rocas. (Llopis & Rodrigo, 2010)

La variación estacional de temperatura es perceptible en los terrenos hasta una profundidad de 10 metros. A profundidades mayores y en la cual exista una baja circulación de agua subterránea, el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibido y mantenerlo buen tiempo, permaneciendo a una temperatura cuasi constante durante el año. El almacenamiento dependerá del clima, de la vegetación, de la cobertura del suelo, de su pendiente, de la cantidad de nieve presente y de las propiedades geológicas del suelo. (Llopis & Rodrigo, 2010)

Por debajo de 20 m de profundidad, la temperatura aumenta a razón de unos 3 °C cada 100 m como consecuencia del gradiente geotérmico, el cual puede incrementarse según la actividad térmica e la zona y su naturaleza geológica. En la mayor parte de las regiones del planeta, las rocas se encuentran a una temperatura de 25 – 30 °C sobre la temperatura ambiental a 500 m de profundidad. (Llopis & Rodrigo, 2010)

Figura 4

Esquema geotérmico de baja entalpia



Nota. Se presentan los componentes de una central de cogeneración, con una bomba se succiona agua caliente y esta última caliente indirectamente a otro tipo de agua para sistemas de climatización, imagen del texto Centrales con Recursos Renovables.

b. Yacimientos geopresurizados.

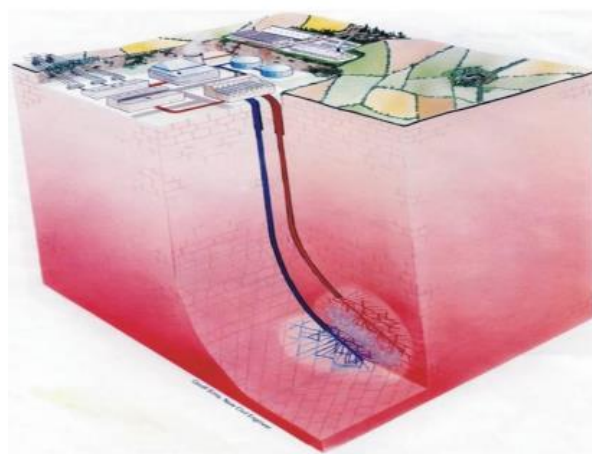
En los sistemas geopresurizados, el fluido, generalmente agua en estado líquido, se encuentra sometido a presiones muy elevadas, que pueden alcanzar hasta 100 MPa, mientras que las temperaturas suelen oscilar entre 150 y 250 °C. Este tipo de sistemas se caracteriza además por la presencia de gases naturales, principalmente metano, lo que actualmente dificulta su aprovechamiento. No obstante, a futuro, con el desarrollo de tecnologías adecuadas que permitan su explotación rentable, sería posible aprovechar de manera conjunta tres formas de energía: la hidráulica asociada a la presión del fluido, la térmica derivada de su contenido de calor y la energía química contenida en los gases naturales. (IRENA, 2021)

c. Yacimientos de roca caliente o petrotérmicos o magmáticos. HDR y HWR.

Los sistemas de roca caliente seca se caracterizan por constituirse por rocas impermeables, con temperaturas entre 150°C - 300 °C y por carecer de acuífero. La impermeabilidad del sistema, su baja conductividad térmica y la carencia de un fluido que lo recorra constituyen el escollo principal para su explotación. De hecho, a pesar de representar estos sistemas un porcentaje muy elevado de los recursos geotérmicos mundiales, aún se encuentran en la etapa de investigación. El avance de técnicas y tecnologías que permitan perforar y acondicionar la roca para convertirla en un sistema de intercambio térmico, capaz de transferir el calor desde una fuente profunda hacia un fluido inyectado desde la superficie, hará posible la conversión de energía térmica en energía eléctrica, con eficiencias estimadas entre el 8% y el 20%.

Figura 5

Esquema de un yacimiento geotérmico de roca seca caliente. HWR



Nota. Se representa el flujo de inyección y succión de agua calentada con las rocas calientes del yacimiento geotérmico, imagen obtenida del ICGC Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

d. Yacimientos geotérmicos marinos.

Un yacimiento geotérmico marino es un sistema geológico submarino donde el calor del manto terrestre se transfiere hacia el agua del subsuelo oceánico. Este calor puede manifestarse mediante emanaciones hidrotermales, fuentes termales submarinas o depósitos de vapor y fluidos calientes aprovechables para la generación de energía. Estos yacimientos se ubican principalmente en: Dorsales oceánicas (p. ej., Dorsal del Pacífico

Oriental), Zonas de subducción (p. ej., Arco de las Marianas o Cinturón de Fuego del Pacífico), Regiones volcánicas insulares (p. ej., Islandia, Filipinas, Japón, Tonga) y Márgenes continentales activos, donde hay fracturas o fisuras que permiten la circulación de fluidos calientes. (Yusukawa, 2019)

Se tienen en la actualidad solo 2 tipos de sistemas, el primero son los sistemas profundos, ubicados geográficamente en zonas de las dorsales oceánicas, a una profundidad de 1 000 a 4 000 m debajo del nivel del mar, y los sistemas superficiales, localizados cerca de la costa con profundidades de 1 a 50 metros. Este tipo de sistema se ha estudiado en el Golfo de California obteniéndose indicadores de aprovechamiento de 12 W/m^2 (Yusukawa, 2019)

2.2.3 Centrales geotérmicas de expansión o destello.

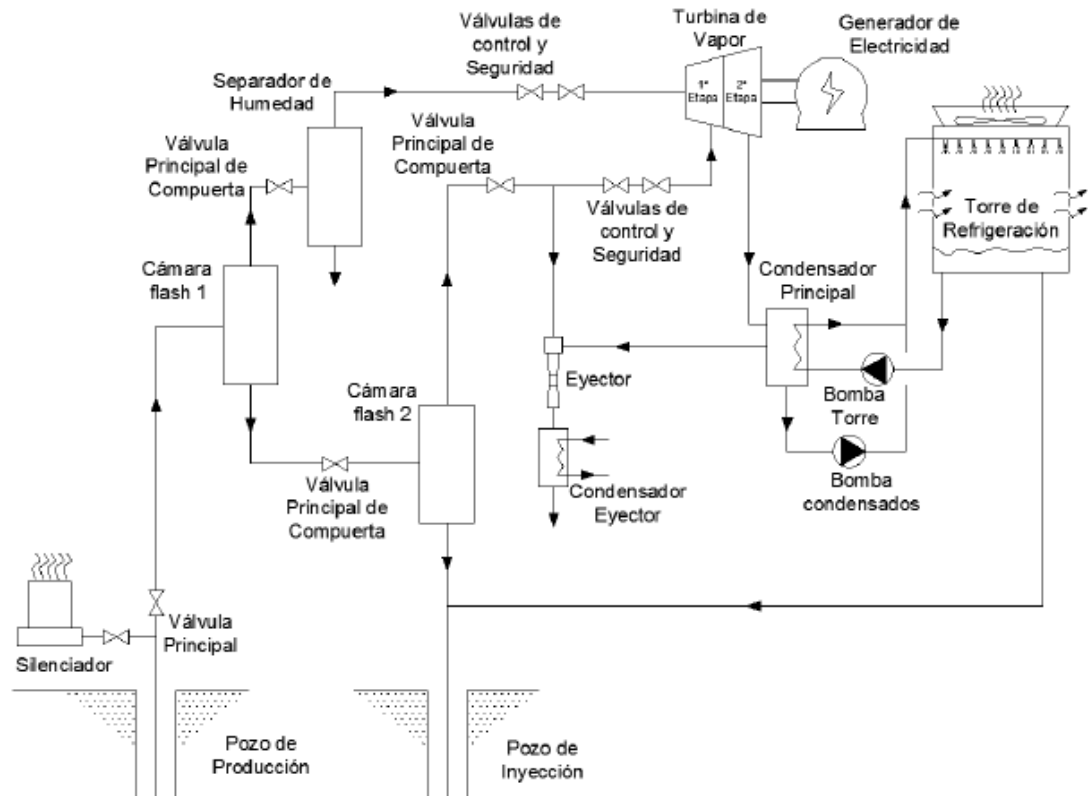
Los yacimientos de vapor seco son poco frecuentes. Los más conocidos son aquellos donde predomina la fase líquida. En los pozos artesianos, el fluido extraído es una mezcla de dos fases, líquido y vapor. La calidad o título de la mezcla es función de las condiciones del fluido en el yacimiento, las dimensiones del pozo, y la presión en la cabeza del mismo, que se controla mediante una válvula. A pesar de que algunas máquinas experimentales han generado energía impulsada por un fluido bifásico. La presión en la cabeza del pozo es relativamente baja, de 0,5 a 1 MPa; con lo cual las fases líquida y gaseosa difieren en su densidad líquido/densidad gas entre 175 a 350, por lo tanto, es necesario el empleo de separadores centrífugos para obtener vapor con un título de 99,99 %. (Pinedo & Ramírez, 2016)

Las centrales anteriores, aunque tienen un mejor rendimiento en el ciclo, solamente pueden utilizarse en los campos geotérmicos de muy alta entalpía, como por ejemplo los de Larderello (Italia), en los que llega a la superficie vapor seco o casi seco; en la mayoría de los yacimientos de alta o media entalpía, el fluido que llega a la superficie es una mezcla vapor-líquido a una presión que depende del pozo y una temperatura que correspondiente al estado de saturación. Para fijar las ideas podemos aceptar, para el agua en la cabeza del pozo, los siguientes valores típicos: la presión absoluta suele estar comprendida entre los 5 y 10 bar y el título de la mezcla, entre 0,1 y 0,5 (10 % a 50% de humedad). (Mendoza, 2014)

En estas condiciones, esta mezcla no puede conducirse directamente a la turbina, puesto que las turbinas convencionales no están diseñadas para trabajar con vapor de tan bajo título: previamente debe separarse el vapor del líquido, la fracción de vapor se conduce a la turbina y la líquida se redestina a otro componente de la central o se rechaza enviándolo al pozo de inyección de agua. Como nos muestra el siguiente esquema. (Mendoza, 2014)

Figura 6

Esquema de una central de doble flash



Nota. Se presentan los componentes de la central de destello con condensador de vacío para presiones de descarga menores a 1 bar hasta 0,1 bar, imagen obtenida de la tesis de Mendoza (2014)

El ciclo opera en tres niveles de presión: alta, media y baja, lo que permite mejorar el rendimiento de la central y extraer una mayor cantidad de vapor a partir del fluido saturado. Gracias a esta configuración, este tipo de centrales logra un aprovechamiento del recurso geotérmico superior, incrementando su utilización entre un 15 % y 25 %. (Mendoza, 2014)

El principio de funcionamiento es similar al de una central de doble flash; sin embargo, en este caso se dispone de un mayor número de válvulas principales de compuerta. Cuando

estas se cierran, el separador activa la válvula de alivio de presión, permitiendo que el líquido separado sea conducido nuevamente al yacimiento geotérmico. Como es sabido, los separadores no alcanzan una eficiencia del 100 %, aunque su rendimiento suele superar el 90 %. No obstante, al emplear dos cámaras de separación o etapas flash, se logra extraer en mayor medida el contenido líquido del fluido bifásico, lo que permite aprovechar una mayor cantidad de vapor en el proceso de turbinado. (Mendoza, 2014)

Es una tecnología que permite el aprovechamiento del recurso geotérmico muy frecuente. Un 29% de las centrales geotérmicas a nivel mundial son del tipo expansión o destello simple. Representan cerca del 43% de la potencia instalada de energía geotérmica a nivel mundial. Presentan potencias alcanzadas entre 3 y 117 MW, con un valor medio de 27 MW. El agua geotermal que alcanza la superficie es una mezcla de líquido-vapor a una presión dependiente del reservorio y de la temperatura de saturación. Generalmente, la temperatura del recurso está entre 180 y 260 °C. El proceso de expansión de las centrales de destello, se señala que el fluido ha atravesado una transición desde el estado de líquido saturado presurizado hacia una mezcla bifásica, como resultado de la caída de presión del fluido geotérmico por debajo de la presión de saturación asociada a su temperatura. El lugar donde ocurre este fenómeno es clave para el desempeño y operación de la central geotérmica. (García, 2021)

El líquido proveniente del separador centrifugo se puede reinyectar, luego de haberse aprovechado un gradiente energético por medio de intercambiadores de calor en gran variedad de aplicaciones directas tal como la generación de energía o la cogeneración, o en aplicaciones a baja presión. Las centrales geotérmicas que utilizan vapor a baja presión para producir energía se conocen como centrales de energía de expansión o flash de una etapa, y las que usan el vapor a alta y media presión se denominan de expansión o flash de dos etapas. Se dividen en:

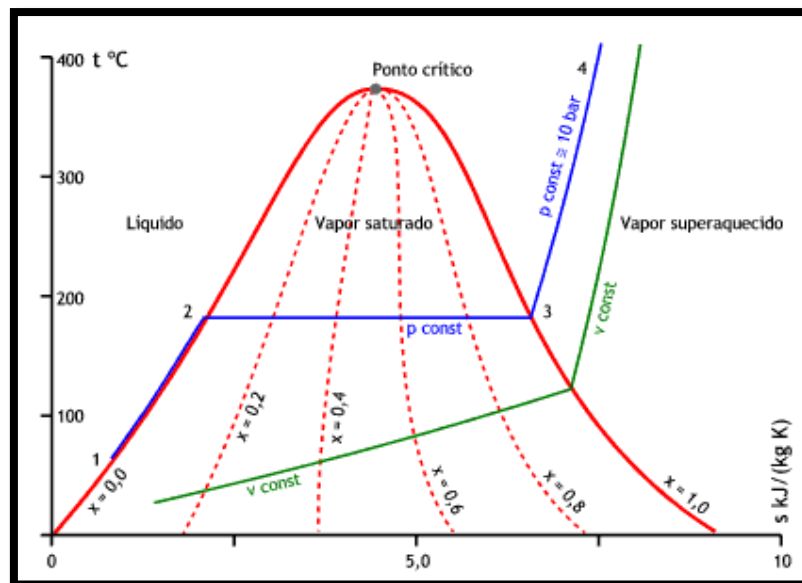
Centrales geotérmicas de expansión única.

Las centrales geotérmicas de expansión súbita de una etapa se utilizan en yacimientos hidrotérmicos las cuales contienen abundante líquido geotermal sobrecalentado y presurizado. El agua se expande a entropía constante de forma súbita al ingresar a un depósito de menor presión. Expandiéndose en vapor saturado y una mayor fracción en

líquido saturado. Luego el vapor es direccionado entre 155 °C a 165 °C o 0,5 MP a 0,6 MPa hacia las turbinas de vapor de vapor saturado, mientras que el líquido comprimido se inyecta al acuífero. El vapor saturado obtenido se expande dentro de una turbina axial de vapor saturado y baja presión la cual permite accionar un generador eléctrico, produce energía eléctrica. Al igual forma que los sistemas geotérmicos de vapor seco, luego de expandirse el vapor y ceder su entalpía, se transforma en vapor húmedo hacia un condensador donde se convierte en agua líquida saturada. Una fracción de este último fluido se emplea como fluido refrigerante, luego de ser enfriado en una torre de refrigeración. (Carta, et al, 2009)

Figura 7

Diagrama T vs S de central geotérmica de expansión simple



Nota. En el diagrama termodinámico se puede identificar el proceso de calentamiento, cambio de estado y sobrecalentamiento del agua a presión constante.

En el caso de que el fluido geotérmico este a una temperatura superior a 210°C y se expande bruscamente en una etapa flash, parte de la misma se vaporiza instantáneamente, este proceso termodinámico genera vapor flash en fracción al vapor total entrante en función al salto de presión realizado. El fluido geotérmico bifásico proveniente del reservorio se dirige hacia un separador ciclónico, de forma que el líquido se reinyecta al pozo o se emplea en procesos internos de planta, o caso contrario en sistemas de calefacción. En ocasiones, para optimizar la separación de las dos fases, se utilizan

baffles junto con una válvula de bola que proporciona seguridad ante la presencia de impurezas del líquido que pueden ingresar en la red de vapor y llegar a la turbina, lo cual es perjudicial para los alabes de la primera etapa, llegando a ocasionar fallas en los materiales por erosión y abrasión. (Carta, et al, 2009)

Un análisis comparativo en una central geotérmica de 55 MW, una del tipo single-flash produce cerca de 630 kg/seg de líquido, mientras que otro tipo vapor directo produce 20 kg/seg, en una relación de 30/1; si todo este líquido se reinyecta, la central de 1 solo etapa de expansión podría devolver al yacimiento cerca del 85% del agua condensada, en comparación con el 15% de la central de vapor directo. La potencia desarrollada por este tipo de centrales varía entre los 3 a 90 MW, con un promedio de 25 MW como potencia característica. Una central geotérmica de 1 expansión de 30 MW requiere de 5 a 6 pozos de producción y 2 a 3 pozos de inyección. La Central Geotérmica de Cerro Prieto en México de 570 MW consta de 5 unidades de generación con expansión, siendo 4 de ellas con expansión única (sumando 470 MW) y la 5 unidad es de doble expansión con turbina de vapor de doble etapa (100 MW). (Carta, et al, 2009)

Cuando en los pozos geotérmicos se genera una mezcla de líquido y vapor, el agua geotermal es conducido hacia tanques de expansión, los cuales son recipientes de presión con forma cilíndrica y diseño ciclónico que permiten dividir las fases con una pérdida mínima de presión. El vapor obtenido se dirige hacia la turbina de vapor, mientras que el líquido remanente se reutiliza en otras aplicaciones. Una planta geotérmica de tipo flash simple con una capacidad aproximada de 30 MW requiere entre 5 y 6 pozos de producción, junto con 2 a 3 pozos de inyección. Estos pozos pueden estar distribuidos en distintos puntos del terreno o perforarse varios desde una misma plataforma. También se pueden emplear sistemas de vapor doble-flash, en los que el fluido pasa por múltiples separadores a presiones cada vez más bajas. El vapor extraído a baja presión se conduce hacia una turbina de vapor de baja presión, o a la sección de baja presión de una turbina multietapas. (García, 2021)

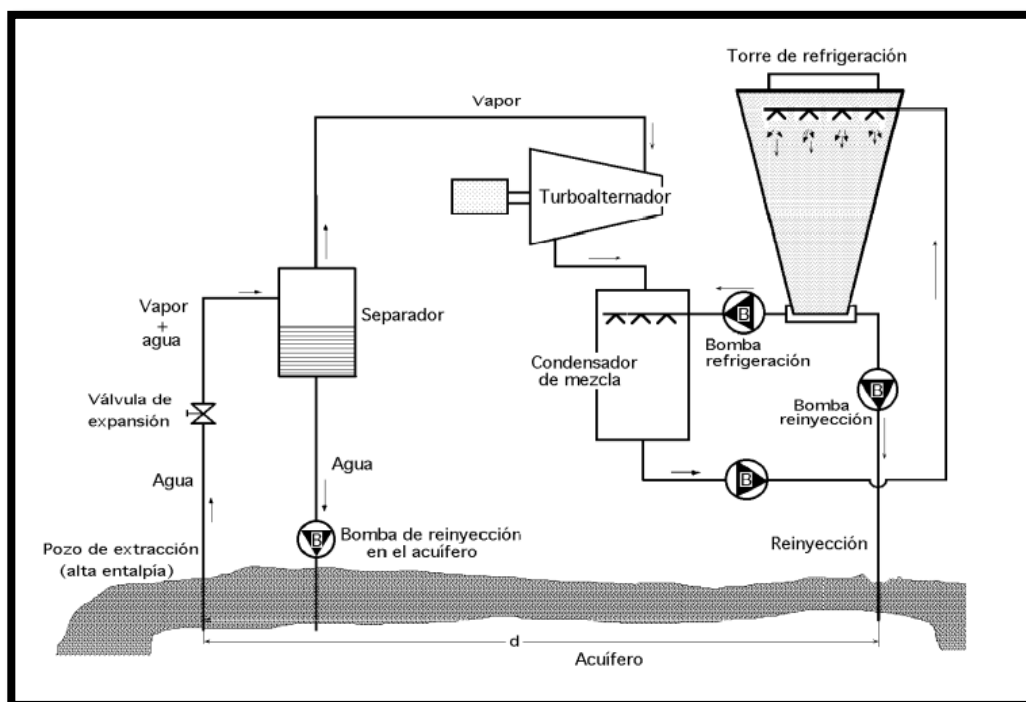
Las centrales geotérmicas de expansión o destello de una etapa se utilizan en yacimientos hidrotérmicos las cuales contienen abundante líquido geotermal sobrecalentado y presurizado. El agua se expansiona a entropía constante de forma súbita al ingresar a un

depósito de menor presión. Expandiéndose en vapor saturado y una mayor fracción en líquido saturado. Luego el vapor es direccionado entre 155 °C a 165 °C o 0,5 MP a 0,6 MPa hacia las turbinas de vapor de vapor saturado, mientras que el líquido se inyecta al acuífero. (Pinedo & Ramírez, 2015)

El vapor saturado obtenido se expansiona dentro de una turbina axial de vapor saturado y baja presión la cual permite accionar un generador eléctrico, produce energía eléctrica. Al igual forma que los sistemas geotérmicos de vapor seco, luego de expandirse el vapor y ceder su entalpia, se transforma en vapor húmedo hacia un condensador donde se transforma en líquido saturado. Una fracción de este último fluido se emplea como fluido refrigerante, luego de ser enfriado en una torre de refrigeración. (Pinedo & Ramírez, 2015)

Figura 8

Esquema de generación de energía con central geotérmica de expansión simple



Nota. Se presenta los principales componentes de la central geotérmico de destello, en la cual la presión de descarga de la turbina de vapor es de 1 bar, además se representa al condensador de mezcla, imagen obtenida de Diez Fernández (2010)

En el caso de que el fluido geotérmico este a una temperatura superior a 210°C y se expansiona bruscamente en una etapa flash, parte de la misma se vaporiza

instantáneamente, este proceso termodinámico genera vapor flash en fracción al vapor total entrante en función al salto de presión realizado. El fluido geotérmico bifásico proveniente del reservorio se dirección hacia un separador ciclónico, de forma que el líquido se reinyecta al pozo o se emplea en procesos internos de planta, o caso contrario en sistemas de calefacción. En ocasiones, para optimizar la separación de las dos fases, se utilizan baffles junto con una válvula de bola que proporciona seguridad ante la presencia de impurezas del líquido que pueden ingresar en la red de vapor y llegar a la turbina, lo cual es perjudicial para los alabes de la primera etapa, llegando a ocasionar fallas en los materiales por erosión y abrasión (Fernández, 2005)

Un análisis comparativo en una central geotérmica de 55 MW, una del tipo single-flash produce cerca de 630 kg/seg de líquido, mientras que otro tipo vapor directo produce 20 kg/seg, en una relación de 30/1; si todo este líquido se reinyecta, la central de 1 solo etapa de expansión podría devolver al yacimiento cerca del 85% del agua condensada, en comparación con el 15% de la central de vapor directo. (Fernández, 2005)

Las centrales geotérmicas con tecnología de 1 sola expansión son las más empleadas en la generación de energía con recursos geotérmicos. Este tipo de centrales son generalmente instaladas en los casos en que el yacimiento geotérmico está compuesto en su mayor parte por líquido o agua geotermal. Par el año 2007 había 159 centrales de energía de esta tecnología operando en 18 países. Las centrales geotérmicas simple flash representan aproximadamente el 32 % de todas las centrales geotérmicas existentes y constituyen más del 42 % de la capacidad geotérmica instalada. La potencia desarrollada por este tipo de centrales varía entre los 3 a 90 MW, con un promedio de 25 MW como potencia característica Una central geotérmica de 1 expansión de 30 MW requiere de 5 a 6 pozos de producción y 2 a 3 pozos de inyección. (Lacourt, 2010)

En la válvula de globo ubicada a la salida del pozo geotérmico, el fluido experimenta una despresurización hasta alcanzar la presión de operación del separador bifásico o tanque de expansión. Este proceso favorece el incremento de la fracción másica de vapor en el fluido geotérmico. Posteriormente, el vapor separado es conducido hacia el conjunto turbina-generator, donde se produce la generación de energía eléctrica. Por su parte, el líquido que se extrae del separador ciclónico corresponde a una salmuera altamente

concentrada, que contiene sales minerales y otros sólidos provenientes del reservorio, como la sílice. Finalmente, el vapor que ha sido expandido en la turbina ingresa a un condensador, donde se enfría y se mezcla con la salmuera, para luego ser reinyectado al yacimiento a través de los pozos de reinyección. (Lacourt, 2010)

Por otra parte, los impactos ambientales se identifican potencialmente en lugares específicos de una planta de energía geotérmica de tipo flash en operación normal. Los principales lugares donde pueden producirse emisiones son: en la boca del pozo, en los silenciadores, en las trampas de vapor, en los desagües de la tubería, en las rejillas de expulsión, y en la torre de enfriamiento. El vapor geotérmico puede contener gases no condensables como CO_2 , CH_4 y H_2S , los cuales generalmente son separados y tratados antes de su liberación a la atmósfera. A pesar de ello, las emisiones de CO_2 en centrales geotérmicas tipo flash son muy bajas (alrededor de 0.06 kg/kWh), siendo significativamente menores en comparación con las centrales a gas natural (0.59 kg/kWh) y a carbón (1.13 kg/kWh). (Ambriz, 2020)

Centrales geotérmicas de doble expansión.

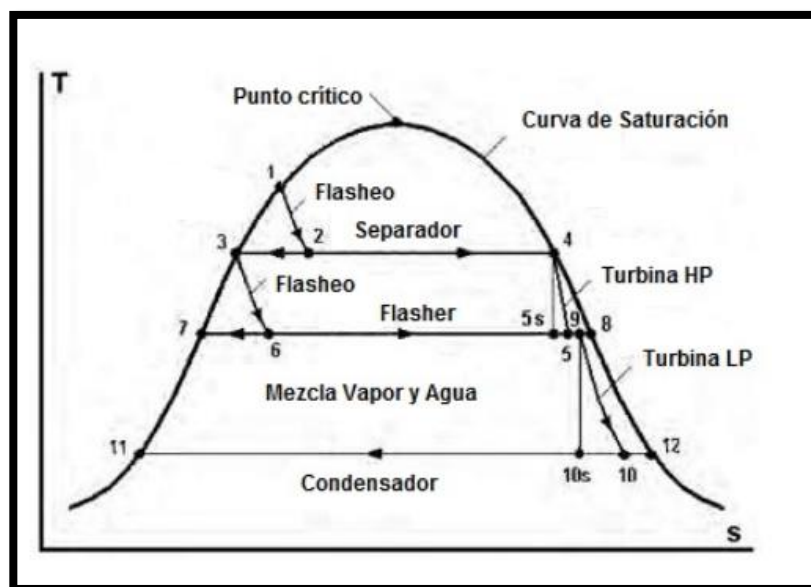
Las centrales geotérmicas doble flash o expansión representan una optimización de las centrales simple flash, llegando a generar 15 y 25 % más de potencia efectiva para iguales condiciones del fluido geotermal. Estas centrales de energía presentan una mayor complejidad en su diseño, son más costosas y requieren de una mayor hora de mantenimiento, pero la potencia adicional generada justifica su instalación. En 2007 el número de centrales geotérmicas de doble expansión era de 69, representando el 14 % de la totalidad de centrales geotérmicas. La potencia efectiva desarrollada por estas unidades de generación varía entre los 4,7 a 110 MW y el promedio de generación de potencia es de 32 MW por unidad. (Lacourt, 2010)

La configuración de las centrales doble flash es similar al simple flash, pero en su arquitectura incluye 2 tanques de separación y 2 conjuntos turbina-generador. El fluido proveniente de los pozos es conducido hacia un separador inicial donde se produce el vapor del fluido geotermal de alta presión y es conducido a la turbina correspondiente. El líquido saturado del 1 tanque se deriva a un 2° separador de media presión, generándose otra fracción de vapor flash a una presión menor. (Lacourt, 2010)

Las centrales de expansión geotérmicas, utilizan una o dos cámaras de expansión o flasheo dependiendo de la temperatura y presión del líquido geotermal a la salida del reservorio geotérmico. El 88% de las centrales geotérmicas funcionan con sistemas que utilizan cámaras flash, debido a que los yacimientos con vapor húmedo son los más comunes en los pozos geotérmicos. La mayor parte de las unidades de generación operan con fluidos geotérmicos con temperaturas cercanas o menores a 200°C. (Salazar et al., 2017)

Figura 9

Diagrama T vs S de central geotérmica de doble expansión



Nota. En el diagrama se trazan los procesos de expansión en los tanques flash y los procesos de expansión en las turbinas de vapor de alta y baja presión para generar potencia efectiva, imagen obtenida de Diez Fernández (2010)

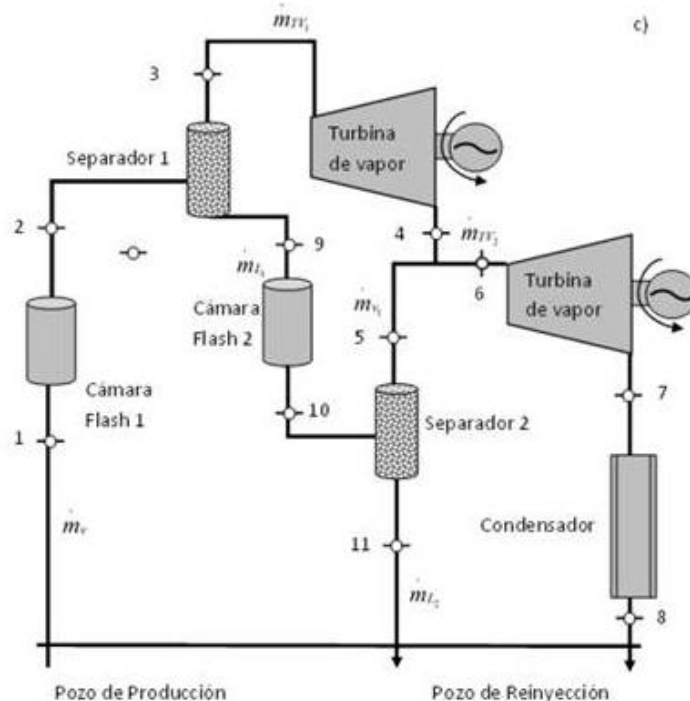
Esta etapa aumenta el rendimiento de planta cerca de 35%. Una tercera etapa no resulta técnica ni económicamente rentable sería rentable, ya que produciría sólo un incremento del rendimiento menor al 5% pero con alta inversión con lo cual su costo variable se hace muy elevado. Mediante esta tecnología se puede obtener entre un 20% a 25% de potencia adicional con el mismo fluido geotérmico. El vapor de baja presión producido se envía a una turbina de baja presión ó a una etapa intermedia de la turbina principal (turbina dual).

Los principios operativos de este tipo de planta son similares a los de generación por expansión única, pero es más costosa debido a que requiere mayor equipamiento. (Fernández, 2005)

Para los sistemas geotérmicos que tienen dos y tres separadores, el efecto de la variación de la presión en la primera cámara se amortigua para valores mayores a $T_1=180^\circ\text{C}$, es decir, al incrementar el número de cámaras flash y de etapas de expansión en la turbina de vapor, el sistema es más robusto y por lo tanto existe la posibilidad de que sólo fluctúe la generación de trabajo en un intervalo de 5 kJ/kg, lo que representa con respecto al trabajo máximo, una disminución del 6%. Para valores de la T_1 menores a 180°C , por este mismo efecto se pierde hasta 10 kJ/kg, lo que representa una disminución del trabajo del 18%. (Salazar, et al, 2017)

Figura 10

Esquema de central geotérmica de doble expansión



Nota. Imagen obtenida de Artículo de investigación de Salazar, et, al. (2017)

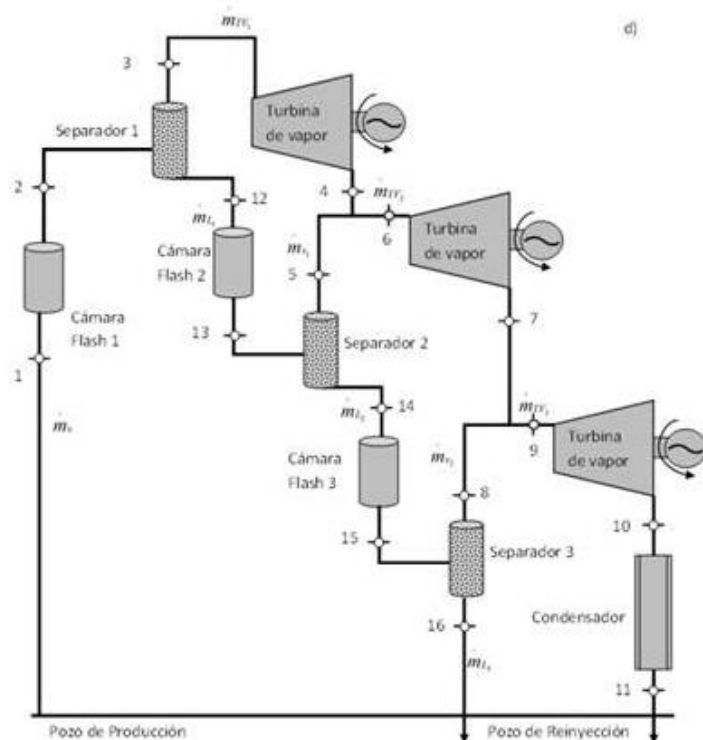
En configuraciones que emplean más de dos cámaras flash, la operación se mantiene dentro de una región segura, ya que la calidad del vapor en la última etapa de expansión

de la turbina supera el valor de 0.88. En el caso de sistemas con una sola cámara flash, la operación segura se logra a presiones menores a 3.5 bar. Asimismo, al aumentar el número de cámaras flash de dos a tres, se obtiene un incremento promedio del 6.6 % en la generación de trabajo. (Salazar, et al, 2017)

Una tercera etapa no resulta técnica ni económicamente rentable sería rentable, ya que produciría sólo un incremento del rendimiento menor al 5% pero con alta inversión con lo cual su costo variable se hace muy elevado. Mediante esta tecnología se puede obtener entre un 20% a 25% de potencia adicional con el mismo fluido geotérmico. El vapor de baja presión producido se envía a una turbina de baja presión ó a una etapa intermedia de la turbina principal (turbina dual). Los principios operativos de este tipo de planta son similares a los de generación por expansión única, pero de mayor costo. (Salazar, et al, 2017)

Figura 11

Esquema de central geotérmica de triple expansión



Nota. Se presenta los tres tanques flash de separación y tres turbinas de vapor, en una configuración en cascada, la potencia efectiva total es la suma de las potencias de cada turbina de vapor, imagen obtenida de Artículo de investigación de Salazar, et, al. (2017)

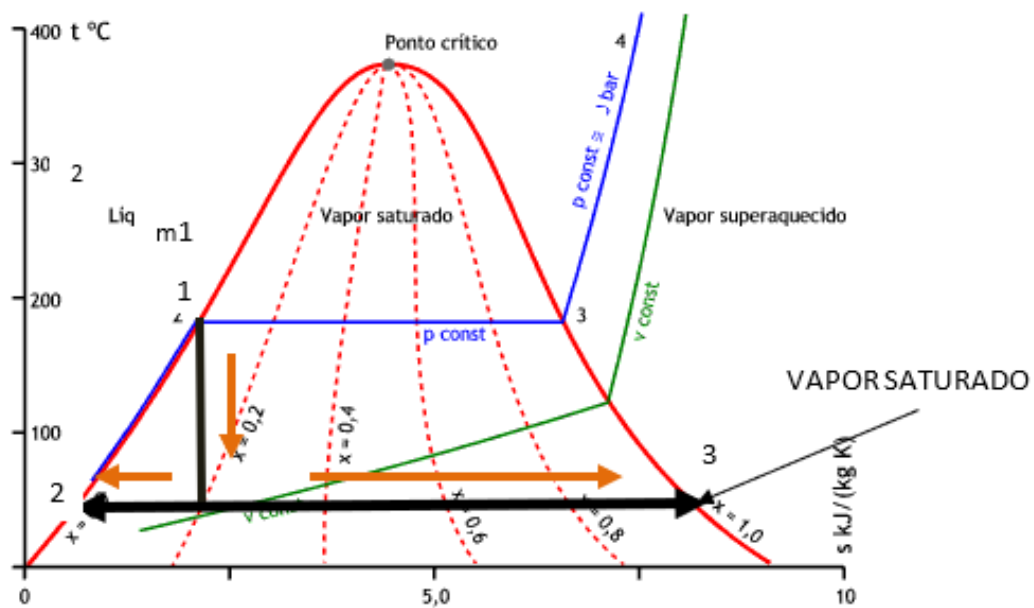
Es importante destacar que los sistemas de dos etapas pueden incrementar el rendimiento en aproximadamente un 40 % respecto a los sistemas de una sola etapa; no obstante, la mejora adicional al incorporar una tercera etapa de expansión resulta considerablemente menor. A pesar de esta ventaja, estos sistemas requieren un mayor volumen de fluido para producir la misma potencia que una planta de conversión directa. Un ejemplo de ello es la central de East Mesa, en California, que desde 1988 genera 37 MW utilizando este tipo de tecnología, pero demanda hasta diez veces más fluido en comparación con una central similar de conversión directa. (Carta, et al, 2009)

2.2.4 Proceso de expansión.

La expansión es un proceso termodinámico durante el cual un fluido de trabajo (gas o vapor) aumenta su volumen y, en consecuencia, disminuye su presión y temperatura, entregando parte de su energía interna o entalpía en forma de trabajo mecánico hacia el entorno. En un proceso de expansión, el sistema realiza trabajo al empujar su frontera de salida, y la presión del sistema disminuye a medida que su volumen aumenta. (Cengel & Boles, 2019)

Figura 12

Proceso de obtención del vapor de centello



Nota. Presenta el proceso de expansión para la obtención de vapor saturado dentro de un tanque flash, imagen obtenida de López (2023)

El vapor flash o de destello es un vapor que presenta características similares al vapor vivo y se genera cuando un condensado pasa desde una presión mayor a otra menor mediante un proceso de expansión idealmente isoentrópico. Durante este proceso, una fracción del condensado se transforma en vapor a la temperatura correspondiente a la nueva presión. La cantidad de vapor generado depende del exceso de calor disponible, el cual se obtiene de la diferencia entre el calor sensible del condensado a la presión inicial y el correspondiente a la presión final, dividido entre el calor latente del vapor a esta última condición. De esta manera, parte del calor sensible del condensado se convierte en calor latente. (Guevara, 2024)

Para un sistema cerrado y un balance de masas y de energía aplicando la 1ª Ley de la Termodinámica, se presenta la ecuación:

$$m_1 = m_2 + m_3 \dots \dots (1)$$

$$m_1 * h_1 = (m_2 * h_2) + (m_3 * h_3) \dots \dots (2)$$

Dónde:

m_1 = Flujo masico de condensado en (kg/sg.)

m_2 = Flujo masico de condensado o liquido saturado. (kg/sg.)

m_3 =Flujo masico de vapor flash generado, en el estado de vapor saturado (kg/sg.)

h_1 = Entalpia específica del condensado en el estado de líquido saturado (kJ./kg.)

h_2 = Entalpia específica del condensado obtenido luego del proceso de generación de vapor flash (kJ/kg.).

h_3 = Entalpia específica del vapor flash, en el estado de vapor saturado (kJ/kg.).

La cámara flash o separador tiene como función principal en los sistemas geotérmicos separar el vapor aprovechable del líquido, el cual suele contener partículas sólidas. Existen diferentes tipos de separadores, pero el objetivo principal es lograr la mayor eficiencia posible en el proceso de separación. El separador tipo vuelta en U funciona mediante la inyección de fluido geotérmico a alta velocidad, el cual, al ingresar por la boquilla superior, impacta contra la pared interna, iniciando la separación entre las fases líquida y gaseosa debido al choque y a la diferencia de densidades a lo largo del recorrido. Al llegar a la sección curva, la fuerza centrífuga favorece que la fracción más

densa —compuesta por líquido y partículas sólidas— se separe del vapor útil. Finalmente, el gas se conduce hacia la tubería de salida, mientras que el líquido junto con los sólidos desciende a través de una pierna barométrica. No obstante, este tipo de separadores presenta eficiencias del orden de 80 % a 90 %, lo cual puede resultar limitado en centrales de media entalpía, donde se busca maximizar la recuperación de vapor aprovechable. (Mendoza, 2017)

Figura 13

Separador de vuelta para central geotérmica de destello

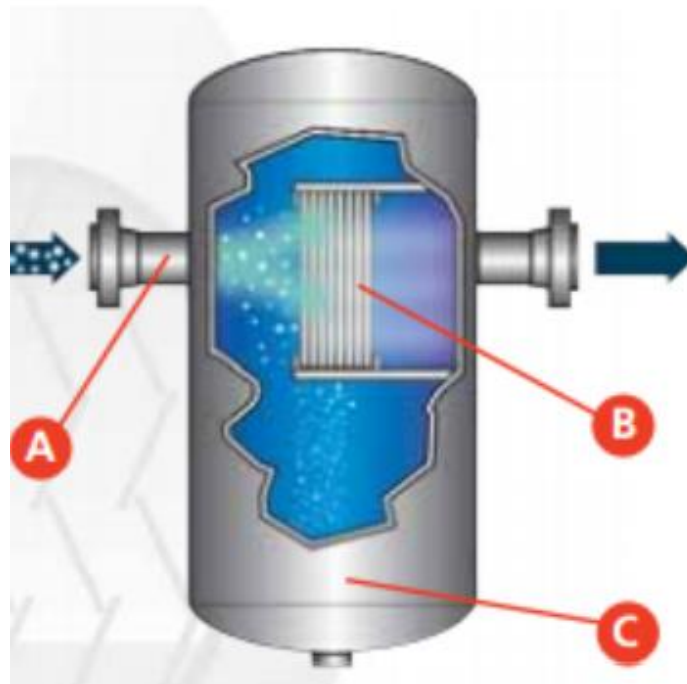


Nota. El separador de vuelta se caracteriza por separar en 2 fases al vapor saturado, tal como se muestra, el cambio de dirección permite la expansión del fluido, retirándose la fase líquida por la parte inferior. Imagen obtenida de Empresa Alfa Laval (2025)

En el caso del separador en línea, uno de los más utilizados, el flujo bifásico ingresa al equipo (A) y, al expandirse en un volumen mayor, el gas tiende a ocupar el espacio disponible. Debido a su inercia, el flujo entra en contacto con las paletas ubicadas en la zona de extracción (B). El cambio brusco de dirección genera fuerzas de inercia que provocan que las gotas de líquido impacten contra las superficies de las paletas. A medida que estas gotas se acumulan, descienden por efecto de la gravedad hacia el depósito ubicado en la parte inferior del separador, separándose del gas, el cual continúa su recorrido y sale por la parte posterior de las paletas. Aunque este tipo de separador no presenta una alta eficiencia, resulta adecuado en aplicaciones donde el espacio disponible es limitado. (Mendoza, 2017)

Figura 14

Separador en línea para central geotérmica de destello

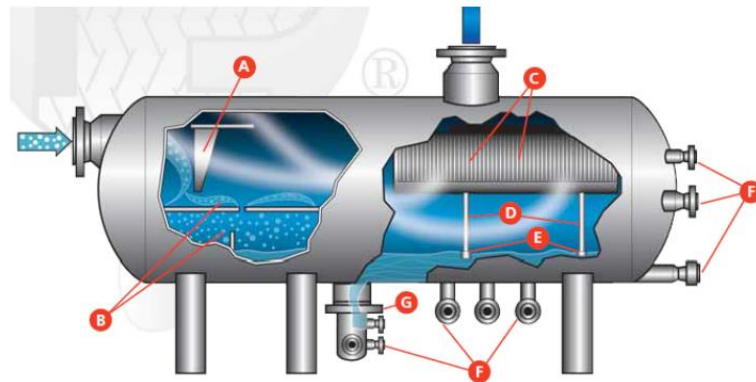


Nota. El separador de línea es el más empleado, y está conformado por un depósito a presión inferior al del fluido entrante, y además un ducto inferior para el líquido saturado y una salida para el vapor saturado, imagen obtenida de Empresa Alfa Laval (2025)

En los separadores horizontales, el flujo bifásico ingresa al recipiente y es desviado por un deflector de entrada que permite la separación inicial de las gotas de líquido (A). Posteriormente, el líquido se deposita en la parte inferior gracias a la acción de placas horizontales, formando un primer nivel de acumulación (B). El gas, junto con las gotas remanentes, pasa a través de un conjunto de paletas (C), donde se separa el líquido residual, el cual se recoge en la parte inferior y se evacua mediante tuberías de drenaje (D). Estas tuberías, al estar sumergidas en el líquido, generan un sello hidráulico que facilita un drenaje eficiente (E), mientras que el gas continúa su flujo y sale por la parte superior del sistema. Los dispositivos de drenaje y control de nivel (F y G) aseguran la adecuada evacuación del líquido acumulado. Sin embargo, este tipo de separadores no es recomendable para su uso en centrales geotérmicas, debido a que pueden presentar problemas de obstrucción y requieren un espacio considerable para su instalación. (Mendoza, 2017)

Figura 15

Separador horizontal para central geotérmica de destello



Nota. El separador horizontal tiene la distribución de ductos de salida similar al separador de línea, con la diferencia de que es un tanque horizontal, imagen obtenida de Empresa Alfa Laval (2025)

Su funcionamiento se basa en la entrada tangencial del fluido al separador, donde unos álabes fijos inducen un movimiento rotacional en la mezcla agua-vapor. Como consecuencia de la fuerza centrífuga, la fase líquida, de mayor densidad, es proyectada hacia las paredes del equipo y se acumula en la parte inferior, desde donde es reinyectada al reservorio. Por su parte, el vapor húmedo asciende hacia el sistema de eliminación de humedad. La cantidad de vapor obtenido en este proceso depende directamente de la presión de separación. (Piedra & Jaramillo, 2011)

Los separadores ciclónicos son dispositivos mecánicos estáticos, ampliamente empleados en la industria, que permiten separar partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas mediante la acción de la fuerza centrífuga. Por su parte, los hidrociclones se utilizan para separar líquidos de diferentes densidades o sólidos presentes en un fluido líquido. Estos equipos se caracterizan por su simplicidad constructiva y la ausencia de partes móviles, lo que facilita su mantenimiento. Sin embargo, presentan como desventaja una limitada versatilidad, ya que no se adaptan fácilmente a variaciones en las condiciones de operación, como cambios en la concentración de partículas, el caudal del gas o la distribución de tamaños. (Mendoza, 2017)

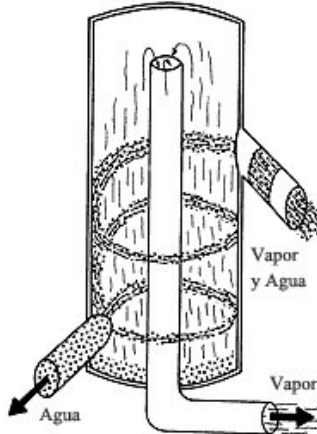
El principio de operación de un ciclón se basa en la separación de las partículas mediante la fuerza centrífuga (del orden de cientos de gramos), lo que lo hace más efectivo que

las cámaras de sedimentación además ocupan un espacio mucho menor que éstas. (Mendoza, 2017)

Los ciclones de entrada axial operan de manera similar a los de entrada tangencial, con la diferencia de que incorporan álabes fijos en la entrada anular, los cuales inducen un movimiento en espiral al gas cargado de partículas. Estos equipos suelen tener diámetros más reducidos (entre 25 y 305 mm), lo que les permite alcanzar una mayor eficiencia, aunque con menor capacidad de procesamiento. Por otro lado, los ciclones de entrada tangencial y descarga axial corresponden al diseño convencional. Aunque pueden fabricarse en diámetros mayores, lo más habitual es que se encuentren en el rango de 600 a 915 mm. En el caso de los ciclones con entrada tangencial y descarga periférica, el gas experimenta un cambio de dirección dentro del equipo, similar al comportamiento observado en un ciclón tradicional. (Mendoza, 2017)

Figura 16

Separador ciclónico para central geotérmica de destello



Nota. Se presenta los detalles del separador vertical en la cual el vapor saturado es expulsado por un ducto interno que intercambia calor con el líquido saturado expandido. Imagen obtenida de Ledesma (2006)

2.2.5 Componentes principales.

En el reservorio el fluido se encuentra bajo condiciones de presión y temperatura, por medio de pozos productivos es conducido hacia la superficie y dirigido al separador ciclónico tangencial, después de realizado el proceso de separación, el vapor es recogido del centro del recipiente por un tubo vertical desde la parte inferior. El vapor entonces

pasa a través de una válvula de retención redonda hacia la casa de máquinas. El líquido separado se dirige hacia un tanque de retención ubicado en la parte inferior del separador, desde donde puede ser conducido hacia el silenciador o hacia los pozos de reinyección. Este sistema tiene como objetivo garantizar una elevada entalpía del vapor a la entrada de la turbina, para un rendimiento óptimo. Por ello, es fundamental el control de la presión del vapor a lo largo de su trayectoria hasta el conjunto turbina-generador. (Piedra & Jaramillo, 2011)

Se cuenta con los siguientes elementos:

POZO PRODUCTOR: Los pozos productores se clasifican, según su trayectoria, en pozos verticales y direccionales, y tienen como finalidad extraer del reservorio geotérmico el vapor y el agua necesarios para la generación de electricidad. La ubicación y cantidad de estos pozos dependen principalmente de la capacidad del proyecto y de la información obtenida en las etapas de exploración. Su perforación se realiza mediante técnicas similares a las empleadas en la industria petrolera. No obstante, deben ser diseñados para soportar altas temperaturas, lo cual influye en el sistema de circulación del fluido, tipo de cable de perforación, revestimiento de paredes y entubado del pozo.

Figura 17

Esquema de un pozo productor.



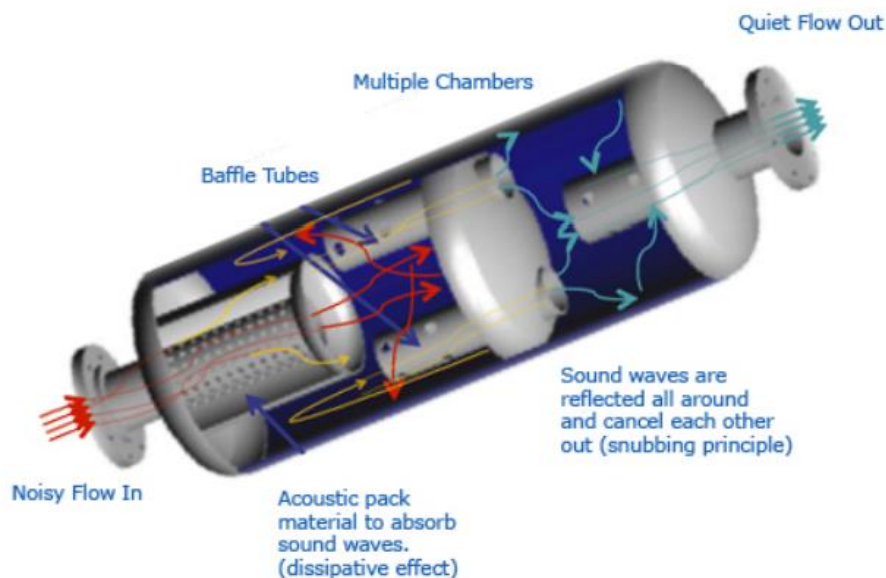
Nota. Se representa gráficamente la diferencia entre un pozo productor y un pozo inyector, en la cual ambas confluyen en el mismo yacimiento geotérmico. Imagen obtenida de Revista Geotérmica UNAM de México Vol. 8 N° 12 (2007)

La mezcla de agua y vapor asciende a través del pozo mediante tuberías, manteniendo constante su entalpía durante el proceso; sin embargo, la presión disminuye progresivamente a medida que el fluido se aproxima a la superficie. En la parte inferior del pozo, este opera bajo la denominada presión de fondo, la cual es inferior a la presión del reservorio. Además, cada pozo productor cuenta con un conjunto de equipos destinados a controlar y monitorear el flujo del fluido geotérmico desde el pozo hasta la central. (Piedra & Jaramillo, 2011)

SILENCIADOR. Cuando la producción de vapor supera la capacidad de la planta, es necesario liberar el excedente para evitar sobrepresiones que puedan dañar el sistema. Sin embargo, la descarga de estos vapores genera altos niveles de ruido, lo que puede afectar tanto al personal de la planta como a la fauna y a las poblaciones cercanas. Por esta razón, se emplean equipos especializados para mitigar dicho impacto. Estos dispositivos también se utilizan en la descarga de agua en ebullición, ya que al entrar en contacto con el ambiente se produce una evaporación súbita que genera ruido. (Piedra & Jaramillo, 2011)

Figura 18

Silenciador fotoacústico de Peerless



Nota. Este accesorio opera mediante la absorción del sonido (materiales porosos) e Interferencia de ondas (desfase acústico) para producir el proceso de expansión. Imagen obtenida de Empresa Alfa Laval (2025)

COLECTOR DE VAPOR. Se trata de un tanque a presión encargado de reunir el vapor procedente de distintos pozos productores y de estabilizar tanto el caudal como la presión en una sola línea de salida, reduciendo las variaciones entre ellos. De esta manera, el vapor es enviado al separador ciclónico en flujo uniforme, conservando condiciones de saturación a presión y temperatura constante. (Piedra & Jaramillo, 2011)

SECADOR (SC): El secador constituye la etapa final en la eliminación de humedad, permitiendo mejorar la calidad del vapor. Es de tipo laberíntico y cuenta con paneles que obligan al vapor un cambio brusco de dirección; como resultado de la fuerza centrífuga y la acción de la gravedad, la humedad es separada y conducida hacia el exterior, donde se recoge en bandejas colectoras. Este equipo se ubica próximo a la turbina y eleva el contenido de vapor saturado hasta un 99%. Cuando la presión supera el valor de operación normal de la turbina, el secador dispone de un disco de ruptura diseñado para soportar una presión determinada; en caso de excederse dicho límite, el disco se fractura, interrumpiendo el suministro de vapor hacia la central como medida de seguridad. (Piedra & Jaramillo, 2011)

Figura 19

Separador de humedad de la compañía TLV



Nota. Se muestra el separador de tipo ciclónico, el cual es de tipo vertical y que tiene una estructura interna en forma de laberinto, es de mayores dimensiones que el separador vertical de línea. Imagen obtenida de Empresa TLV (2025)

Los denominados “Demister” son dispositivos instalados en recipientes de vapor cuya función es separar el líquido arrastrado, mejorando la calidad del vapor al eliminar las gotas presentes en la corriente. Estos equipos pueden consistir en mallas coalescentes, paquetes de paletas u otras estructuras diseñadas para favorecer la aglomeración de la niebla en gotas de mayor tamaño, las cuales posteriormente se separan del flujo de vapor. Además, los desnebulizadores permiten reducir el tiempo de residencia necesario para la separación de las gotas, lo que contribuye a disminuir el volumen del equipo. Su uso es común en aplicaciones donde se requiere vapor de alta calidad, especialmente en etapas críticas como la entrada a una turbina. (Mendoza, 2017)

TUBERÍAS DE VAPOR Y LÍNEAS DE AGUA. El suministro de vapor hacia la turbina se realiza mediante una red de tuberías conectadas a un sistema de recolección o colector de vapor. Dado que, en muchos casos, la central geotérmica se encuentra alejada de los pozos productores, el diseño de estas líneas de transporte requiere un análisis detallado, especialmente en lo referente a la regulación de caudales, debido a su influencia directa en la viabilidad económica del proyecto. Asimismo, ante situaciones como una parada de operación o una disminución repentina de carga, se dispone de un sistema de emergencia compuesto por diversas válvulas que permiten regular el flujo, liberarlo a la atmósfera o redirigirlo hacia otros puntos de consumo, con el fin de proteger los equipos de la central. En este sistema se distinguen dos ramales principales: la línea principal, que conduce el vapor hacia la turbina, y la línea secundaria, asociada al sistema de enfriamiento. Por otro lado, los materiales utilizados en las tuberías deben ser capaces de resistir las condiciones de operación del fluido, tales como presión, temperatura, viscosidad y posibles efectos químicos. (Piedra & Jaramillo, 2011)

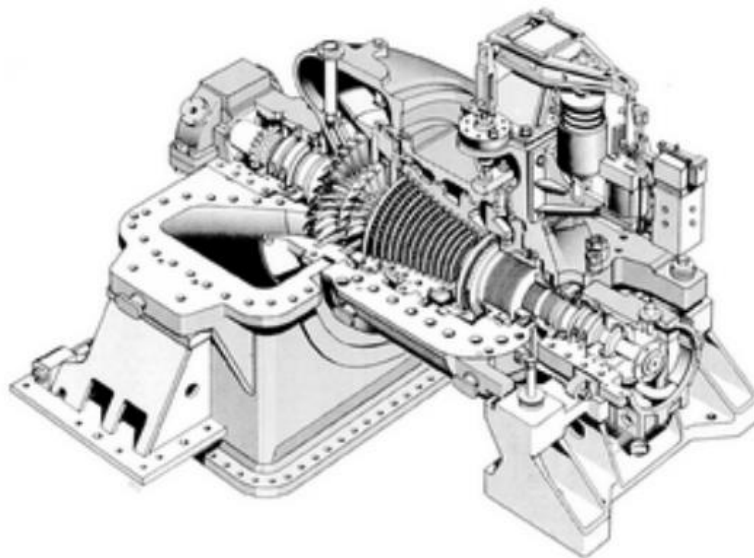
Turbina de vapor. Son equipos térmicos que convierten la energía del vapor a alta presión y temperatura en energía útil. Durante su operación, el vapor se expande hasta una presión más baja, debido a los cambios en su volumen específico dentro de la máquina. Como consecuencia, parte de la diferencia de entalpía entre la entrada y la salida del vapor se transforma en energía mecánica en el eje. (Mendoza, 2017)

A la hora de diseñar una turbina en geotermia hay que seguir estos 3 principios:

- Se debe tener especial cuidado con el vapor saturado cuando presenta un alto título, ya que tiende a condensarse al disminuir la presión y aumentar la humedad relativa. La presencia de humedad genera un efecto de frenado sobre los álabes de la turbina, provocando su desgaste por erosión. Esto conlleva una reducción del rendimiento, debido a la alteración de las condiciones de operación de la turbina y al deterioro del sistema de drenaje. Situaciones similares se presentan en las turbinas de vapor de centrales nucleares, donde se emplean separadores de humedad para mejorar la eficiencia y se protege la carcasa mediante recubrimientos o placas de acero inoxidable resistentes a la erosión.. (Mendoza, 2017)

Figura 20

Sección de turbina de condensación GE sin extracción de baja potencia



Nota. Se presenta los componentes internos de una turbina de vapor de condensación de 1 etapa, destacando el eje o rotor de la turbina de múltiples escalonamientos. Imagen obtenida de Empresa General Electric (2025)

- En los sistemas geotérmicos, el flujo de vapor suele transportar pequeñas partículas sólidas provenientes del interior de la corteza terrestre. La acumulación de estos micro sólidos a lo largo del paso del vapor por la turbina afecta negativamente su rendimiento. Además, según la dureza y el tamaño de dichas partículas, distintos componentes de la turbina pueden sufrir desgaste por erosión. La fuerza con que golpeen estas partículas disminuye la resistencia a fatiga provocando una rotura

catastrófica. Si además golpea con demasiada fuerza puede llegar a avería la turbina también. De manera preventiva se colocan los separadores, para que así no lleguen las partículas a la turbina.

- El análisis de los gases no condensables provenientes del yacimiento, como compuestos de azufre y cloro, ha evidenciado su carácter corrosivo. A partir de ello, se han realizado estudios en pozos geotérmicos para identificar materiales adecuados que resistan estas condiciones. Como resultado, se ha determinado que los materiales más apropiados son aleaciones de acero con cromo, acero al cromo-molibdeno y acero inoxidable, debido a su alta resistencia a la corrosión. (Mendoza, 2017)

La condensación es un proceso físico mediante el cual un fluido pasa del estado gaseoso al estado líquido, lo que ocurre cuando la temperatura del vapor desciende por debajo de su temperatura de saturación. Desde un enfoque más técnico, este fenómeno se produce cuando el vapor cede calor: primero se reduce su temperatura y, posteriormente, al liberar el calor latente, se genera el cambio de fase dando lugar al condensado. Este proceso depende principalmente de las condiciones de presión y temperatura. En condiciones naturales, a una presión cercana a 1 bar, la condensación se presenta cuando la temperatura es inferior a 100 °C. Además, la condensación está gobernada por principios termodinámicos, particularmente por la relación entre la energía y la entropía del sistema. (Mendoza, 2017)

En un condensador, la formación de vacío se debe principalmente a la condensación del vapor, ya que el volumen específico del vapor es considerablemente mayor que el del líquido. Al producirse el cambio de fase, el volumen ocupado por el fluido se reduce de forma significativa, generando así condiciones de vacío en el interior del equipo. Por ejemplo, una cierta cantidad de agua a 61 °C puede ocupar un volumen muy reducido en comparación con el vapor que originalmente llenaba el recipiente, llegando a representar solo una pequeña fracción del volumen total del condensador. Asimismo, al inicio de la operación, el condensador contiene aire y, durante su funcionamiento, se acumulan gases no condensables. Por ello, es necesario contar con un sistema de extracción de estos gases, con el fin de mantener las condiciones de vacío para las cuales fue diseñado el equipo. (Mendoza, 2017)

Los condensadores de contacto directo funcionan mediante la transferencia de calor a través del contacto directo entre el fluido de trabajo (vapor) y el refrigerante. Su principal ventaja es que el área de intercambio térmico es máxima, ya que abarca todo el volumen ocupado por el vapor. Al no existir una superficie metálica que separe ambos fluidos, el coeficiente de transferencia de calor es mayor, lo que permite lograr la condensación en menor tiempo. (Mendoza, 2017)

Los condensadores de contacto directo de tipo spray en contracorriente son los más utilizados en centrales geotérmicas de destello. Se denominan así porque el fluido refrigerante circula en sentido opuesto al flujo de vapor. Este tipo de equipo está conformado por una vasija de rociado, una entrada de vapor, una salida de condensado y una salida de gases no condensables. Su funcionamiento consiste en condensar el vapor saturado proveniente de la turbina; como resultado de este proceso se genera un vacío que facilita la entrada de mayor cantidad de vapor. El flujo de vapor se introduce en sentido contrario al refrigerante, el cual es pulverizado en forma de gotas, con el fin de reducir su velocidad y aumentar el tiempo de contacto, mejorando así la transferencia de calor. En aplicaciones geotérmicas, la vasija suele fabricarse en acero inoxidable AISI 316L y cuenta con una abertura inferior para la evacuación del condensado por gravedad. Las dimensiones del equipo dependen de diversos factores: la altura está relacionada con las condiciones de operación, mientras que el diámetro se determina en función del número de rociadores requeridos. (Mendoza, 2017)

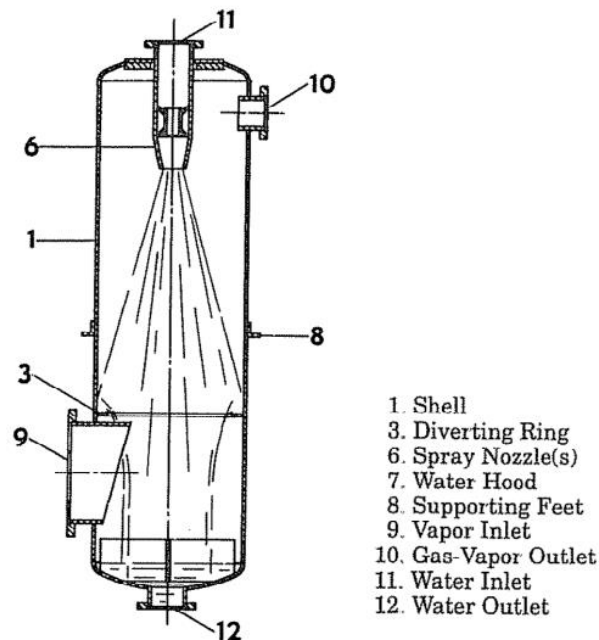
Este equipo dispone de una entrada de vapor ubicada en la parte más baja posible, lo que favorece la generación de turbulencia y, en consecuencia, incrementa el coeficiente de transferencia de calor dentro de la vasija. Asimismo, cuenta con dos salidas: una destinada a la evacuación de los gases no condensables, ubicada en la parte superior del condensador, y otra para la descarga del condensado. (Mendoza, 2017)

Por último, como elemento indispensable están los rociadores de que consiguen saturar el vapor que ayudado el fluido líquido aromatizado procedentes de espray rociadores. Estos rociadores en función del caudal que expulsan y el ángulo de aspersión determinarán el diámetro del condensador (dependiendo de la cantidad de rociadores y del diámetro de los mismo, determinará el diámetro de la vasija). La selección del

tamaño de la gota, generalmente aproximada como una esfera, depende de las condiciones de vacío y de operación del sistema. Los rociadores suelen ser de tipo espiral, lo que evita la acumulación de suciedad y permite ampliar el área de dispersión del fluido refrigerante. Al elegir un rociador, se busca que pueda manejar un alto caudal y que atomice el líquido en gotas lo más finas posible, considerando además el área de cobertura de cada dispositivo. Cuando se requiere un caudal elevado, se emplean rociadores de cono axial; sin embargo, estos reducen el área de aspersion y generan gotas de mayor tamaño, por lo que su uso se limita a situaciones específicas. (Mendoza, 2017)

Figura 21

Condensador a contracorriente de tipo Spray



Nota. El condensador vertical en contracorriente de contacto directo es empleado en turbinas de vapor de contrapresión o 1 bar de descarga. El agua a temperatura ambiental ingresa por la parte superior. Imagen obtenida de Standards for Direct Contact Barometric and Low level Condensers- Heat Exchange Institute, 7 Edition, 2004

2.2.6 Costos nivelados de generación.

El costo nivelado (generalmente llamado Costo Nivelado de Energía – LCOE, por sus siglas en inglés) es un indicador económico que permite calcular cuánto cuesta producir 1 unidad de energía (por ejemplo, 1 kWh de electricidad) considerando todos los costos de una central a lo largo de toda su vida útil. Se usa en estudios de viabilidad técnica–

económica, comparación de tecnologías (solar, eólica, gas, geotermia, hidrógeno, etc.) y toma de decisiones en proyectos energéticos. El costo nivelado representa el valor presente de todos los costos de un sistema energético dividido entre el valor presente de toda la energía generada durante su vida útil. (IEA, 2020)

Sirve para:

- Comparar distintas tecnologías de generación (solar, gas, eólica, geotérmica...).
- Tomar decisiones de inversión.
- Determinar la competitividad real de un proyecto.
- Evaluar proyectos renovables donde no hay costo de combustible (como geotermia o solar). (IEA, 2020)

El análisis energético basado en el LCOE permite a empresas, desarrolladores e inversionistas evaluar la competitividad de los proyectos de generación eléctrica. Asimismo, facilita la comparación de los costos de producción entre distintas tecnologías, sirviendo como una herramienta clave para respaldar la toma de decisiones tanto de formuladores de políticas como de analistas. (Gomstyn & Jonker, 2024)

El LCOE constituye un indicador clave en la transición energética global, ya que permite evaluar el paso de fuentes basadas en combustibles fósiles de altas emisiones hacia tecnologías renovables y de bajo carbono. A medida que evolucionan las condiciones económicas y políticas, también se modifica el contexto de esta transición. Por ejemplo, los incentivos gubernamentales pueden mejorar la viabilidad financiera de los proyectos renovables, mientras que el incremento en los costos de los combustibles reduce el atractivo de las tecnologías convencionales. En este escenario, el LCOE se convierte en una herramienta fundamental para que los tomadores de decisiones determinen la rentabilidad y viabilidad de distintas alternativas de generación eléctrica limpia. (Gomstyn & Jonker, 2024)

El LCOE de la energía geotérmica no ha experimentado una disminución tan grande debido a los costos de capital relativamente altos en comparación con otras tecnologías de energía renovable. Sin embargo, los precios podrían caer más en el futuro debido a nuevas iniciativas, como Enhanced Geothermal Energy Shot, un programa de

investigación del Departamento de Energía de EE. UU. Estas reducciones en los costos han permitido que las energías renovables sean cada vez más competitivas frente a la generación basada en gas y carbón, cuyos valores de LCOE pueden alcanzar hasta 228 USD y 168 USD, respectivamente, lo que favorece el avance de la transición energética global. Asimismo, los conflictos geopolíticos han impulsado el incremento en los precios de los combustibles fósiles y de la electricidad, aumentando aún más el atractivo de los proyectos de energía renovable. (Gomstyn & Jonker, 2024)

Componentes específicos a considerar en geotermia:

CAPEX:

- Exploración y estudios (sísmica, geofísica).
- Perforación de pozos de producción (cada pozo tiene costo alto).
- Plataforma, tuberías, separadores, turbina, generador, condensador, subestación.
- Obras civiles y accesos.

OPEX (anual):

- Operación y mantenimiento, repuestos (corrosión, depósitos minerales).
- Químicos, monitoreo del campo, supervisión de pozos.
- Costos de personal, seguros, tasas/royalties ambientales. (IEA, 2020)

Reinversiones / reemplazos:

- Workovers o nuevos pozos (pueden ocurrir a mitad de vida).
- Renovaciones de equipos (p. ej. renovación de turbogenerador a 15–20 años)

Otros:

- Costos de reinyección (bombas) y manejo de gases no condensables (stripper).
- Costos de conexión a red y pérdidas.
- Impuestos, subsidios, incentivos, contratos de venta. (IEA, 2020)

Sensibilidades (qué altera más el LCOE)

- CAPEX: la perforación de pozos impacta fuertemente; un +10 % en CAPEX aumenta notablemente el LCOE.
- Factor de planta / disponibilidad: las mejoras en disponibilidad reducen el LCOE al aumentar MWh/año sin aumentar gastos.

- Tasa de descuento (r): proyectos con mayor riesgo/financiamiento caro suben el LCOE.
- OPEX: aunque suele ser menor que CAPEX, incrementos repetidos impactan el PV de costos.
- Reinversiones (nuevos pozos): si haces workovers costosos a mitad de vida, añaden PV y elevan LCOE.
- Declinación del recurso: si la producción anual declina, PV_energía disminuye → LCOE sube. (IEA, 2020)

Tabla 1

Valor del LCOE según diversas fuentes internacionales

Fuente	Tipo / contexto	Valor LCOE estimado	Observaciones
International Renewable Energy Agency (IRENA) – 2017	Plantas geotérmicas de flash / directo-vapor	USD 0.04–0.14/kWh (\approx USD 40-140/MWh) (<u>IRENA</u>)	Este rango incluye tanto proyectos de expansión como nuevos greenfield; sitio-dependiente.
Informe técnico “Factors affecting the cost of electricity from geothermal power plants” (2021)	Plantas geotérmicas (flash, expansión)	USD 40-170/MWh (<u>stumejournals.com</u>)	Rango amplio: mínimo para expansión en buenos campos (\sim 40 USD/MWh).
Global promedio (2023/24)	Geotermia en general	\sim USD 0.06/kWh (\approx USD 60/MWh) (<u>thinkgeoenergy.com</u>)	Valor promedio ponderado, incluye distintos tipos de tecnología.

Nota. Se muestra los valores del LCOE según tres fuentes, en las cuales el valor menor es de 40 U\$/MWh según IRENA, mientras que el valor máximo es de 170 U\$/MWh, en ambos casos los valores de costo nivelado son para centrales geotérmicas de destello.

III. Metodología.

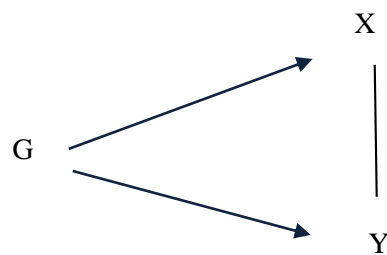
3.1 Método:

El presente trabajo de investigación es aplicado, de naturaleza descriptiva.

El objetivo es plantear mejoras o estrategias o determinar modelos de mejor desempeño (para centrales geotérmicas de destello en función a las presiones de expansión).

3.2 Diseño de la investigación:

El diseño de la investigación es no experimental, ya que no se manipulan físicamente los equipos reales del sistema, sino que se trabaja con datos y modelos para simular el comportamiento del sistema ante variaciones de presión. Y de tipo longitudinal, porque se utiliza cuando el interés del investigador es el análisis de cambios que se presentan con el tiempo para determinadas variables o entre las relaciones entre ellas, en este caso cómo varía la potencia efectiva generada ante diferentes condiciones de presión de expansión.



Donde:

G: Central geotérmica de destello.

X: Presión de expansión en separadores.

Y: Potencia efectiva en generador.

3.3 Población y muestra:

La población y muestra es única, a lo cual la muestra fue seleccionada intencionalmente. Para nuestra investigación es Covire, en Tacna, lugar en donde se determinará la potencia efectiva máxima de una central geotérmica de destello, teniendo en cuenta la o las presiones de expansiones de los separadores de este tipo de tecnología de generación.

Del cual se presenta la siguiente información relevante:

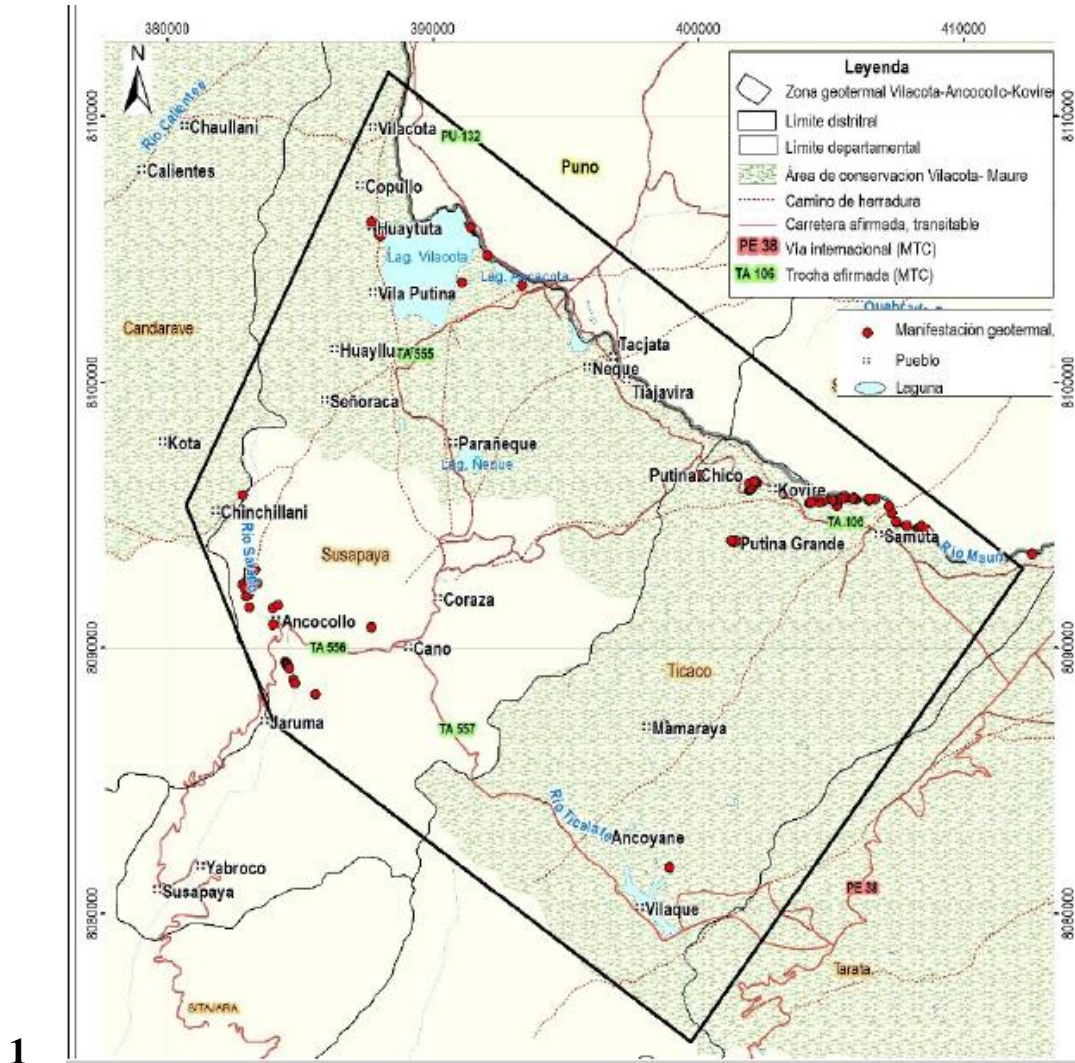
Las zonas geotermales de Covire, junto a las de Vilacota y Ancocollo se encuentran localizadas en la parte central y oeste de la Cordillera Occidental de los Andes, entre los 4 200 y 4 800 m s. n. m., en una zona altiplánica perteneciente a los distritos de Ticaco y Susapaya, provincia de Tarata, departamento de Tacna, al sur del Perú. Alrededor de las zonas geotérmicas, se encuentran centros volcánicos y domos de edad Cenozoica alineados con rumbo NE-SO con pendiente entre 30° y 70°. Los sistemas geotermales de Covire, Vilacota y Ancocollo están localizados dentro del área de la Región 5–Eje volcánico sur. Esta región tiene un área de 104 498 km², y abarca a las regiones de Arequipa, Moquegua, Tacna y también parte de Apurímac, Ayacucho y Cusco. Esta región es considerada como la más promisoría del país debido a la presencia de actividad volcánica reciente. Temperaturas superficiales cerca de 90°C, con lo cual en función al gradiente geotérmico se tienen temperaturas de 220°C en promedio.

El sistema geotermal en Covire está asociado a flujos de calor relacionados a la actividad volcánica presente en la zona alineada en dirección NO-SE, de edades menor que 1 Ma. Asimismo, alrededor de la zona de estudio existen diferentes sistemas volcánicos de edades que varían desde el Mioceno superior hasta el Plioceno. La cámara magmática (fuente de calor) está asociada al complejo volcánico Purupuruni-Pisarane; en niveles profundos libera gases volátiles que interaccionan con aguas subterráneas durante su ascenso y se manifiesta en superficie como fumarolas y fuentes termales. Asimismo, el sistema hidrológico en el área de estudio permite que el agua meteórica o superficial se infiltre en ciertas profundidades favorecida por la actividad geotectónica y estructural, generando factores primordiales que controlan la recarga, circulación y descarga de los fluidos geotérmicos a nivel profundo y superficial.

La estimación de la temperatura para los sistemas geotermales Kovire y Ancocollo-Vilacota se realizó mediante los geotermómetros catiónicos. Para Kovire, se estimó la temperatura de reservorio entre 210 ° C y 250 ° C y alcanza el equilibrio agua-roca; mientras que para el sector Ancocollo, la temperatura del reservorio se estimó entre 200 ° C y 240 ° C con equilibrio parcial. (Cruz et al., 2024)

Figura 22

Mapa de ubicación del área de estudio-Yacimiento geotérmico de Covire.



Nota. Se presenta la ubicación de los yacimientos de Covire, Ancollo y Villacota en Tacna, destacando con puntos rojos la manifestación geotermal y presencia de dos lagunas . Imagen obtenida del informe técnico del INGEMMET, elaborado por Cruz et al. (2024)

Del mismo modo se presenta información referente a los valores de temperatura realizados al sistema de Kovire en los siguientes anexos:

Anexo 1 : Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Kovire

Anexo 3: Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Ancocollo

3.4 Operacionalización de las variables:

Variable independiente: Presión de expansión.

Definición: La presión de expansión (también conocida como presión de descarga en ciclos termodinámicos) es la presión a la cual un fluido de trabajo se expande luego de haber sido calentado o comprimido, generalmente en una turbina o motor de expansión. Esta presión es menor que la presión de entrada y su valor afecta directamente la cantidad de trabajo que puede extraerse del sistema. (Boles & Cengel, 2015)

Los indicadores de la variable independiente son:

- Presión de ingreso a las etapas de expansión (Bar)
- Presión intermedia de las etapas de expansión. (Bar)
- Fracción de vapor geotermal obtenido (kg/s)
- Flujo masico de agua geotermal. (kg/s)

Variable dependiente: Potencia efectiva.

Definición: Es la potencia de salida de un generador o también llamada potencia eléctrica generada o potencia útil, la cual es obtenida a partir de una potencia inicial entregada (por una maquina motriz que puede ser desde una turbina de vapor, turbina a gas, motor de combustión interna u otro mecanismo mecánico) la cual pasa por un proceso de transformaciones hasta obtenerse una potencia final de salida desde el generador eléctrico. (Sandoval, 2022)

Los indicadores de la variable dependiente son:

- Flujo masico de vapor geotermal (kg/s)
- Diferencia de entalpias de entrada y salida de la turbina de vapor (kJ/kg)
- Potencias intermedias generadas (MW)

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

Las técnicas de recolección de información:

Técnica de campo u Observación. Las técnicas de observación son un conjunto de técnicas y herramientas orientadas a evaluar un fenómeno, un individuo o un grupo de personas. Implican una manera de acercarse a la realidad del sujeto u objeto para conocerla. Generalmente se estudian conductas y comportamientos observables.

- Técnica documental o Documentación, es una técnica de investigación cuantitativa que se encarga de recopilar y seleccionar información a través de la lectura de documentos, libros, revistas, grabaciones, filmaciones, periódicos, bibliografías, entre otras. Se empleará la técnica documental para recolectar información secundaria clave que permita modelar adecuadamente el sistema. Esta incluirá:
- Datos del yacimiento geotérmico Covire (Tacna): temperatura del reservorio, presión, caudal y características del fluido geotérmico (obtenidos de informes del INGEMMET).
- Información técnica sobre plantas geotérmicas de destello (flash steam): configuraciones típicas, parámetros de diseño, eficiencias, condiciones de operación, obtenidos de: Libros de termodinámica aplicada, separatas del curso tecnología Energética, Manuales de turbinas geotérmicas, tesis.
- Datos de referencia sobre turbinas geotérmicas: eficiencia isentrópica, condiciones de entrada y salida, obtenidos de fichas técnicas de fabricantes o estudios previos.

Los instrumentos de recolección de datos son los siguientes:

- Registro de información, consiste en un instrumento de recolección de información a registrar de acuerdo a los factores que son resultados.
- Ficha técnica, son los instrumentos que permiten el registro e identificación de las fuentes de información, así como el acopio de datos o evidencias.

3.6 Procedimiento o forma de tratamiento de la información.

Se describe el procedimiento de la investigación:

Para la caracterización de un sistema de expansión simple.

Premisas:

Se tiene en cuenta la figura 10 y las ecuaciones 1 y 2 para los cálculos de los flujos masicos salientes del separador 1.

Para la figura 22 se cumple:

La potencia efectiva generada por la turbina de vapor:

Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$P_{TV} = \dot{m}_v * (h_3 - h_4) * \eta_{TV} \dots \dots \dots (3)$$

Dónde:

$\dot{m}_v = \dot{m}_3$ = Flujo de vapor generado por hora,

$(h_3 - 4)$ =Variación de entalpía de vapor a la entrada y salida de la turbina de vapor.

η_{TV} = Eficiencia de la turbina de vapor.

Para la potencia de energía eléctrica generada P_{GE} se tiene la siguiente ecuación:

$$P_{GE} = P_{TV} * \eta_{GE} \dots \dots \dots (4)$$

Dónde:

η_{GE} = Eficiencia del generador eléctrico.

Para el balance de masa y energía en el condensador de contacto.

Para el balance de masa se cumple:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \dots \dots \dots (5)$$

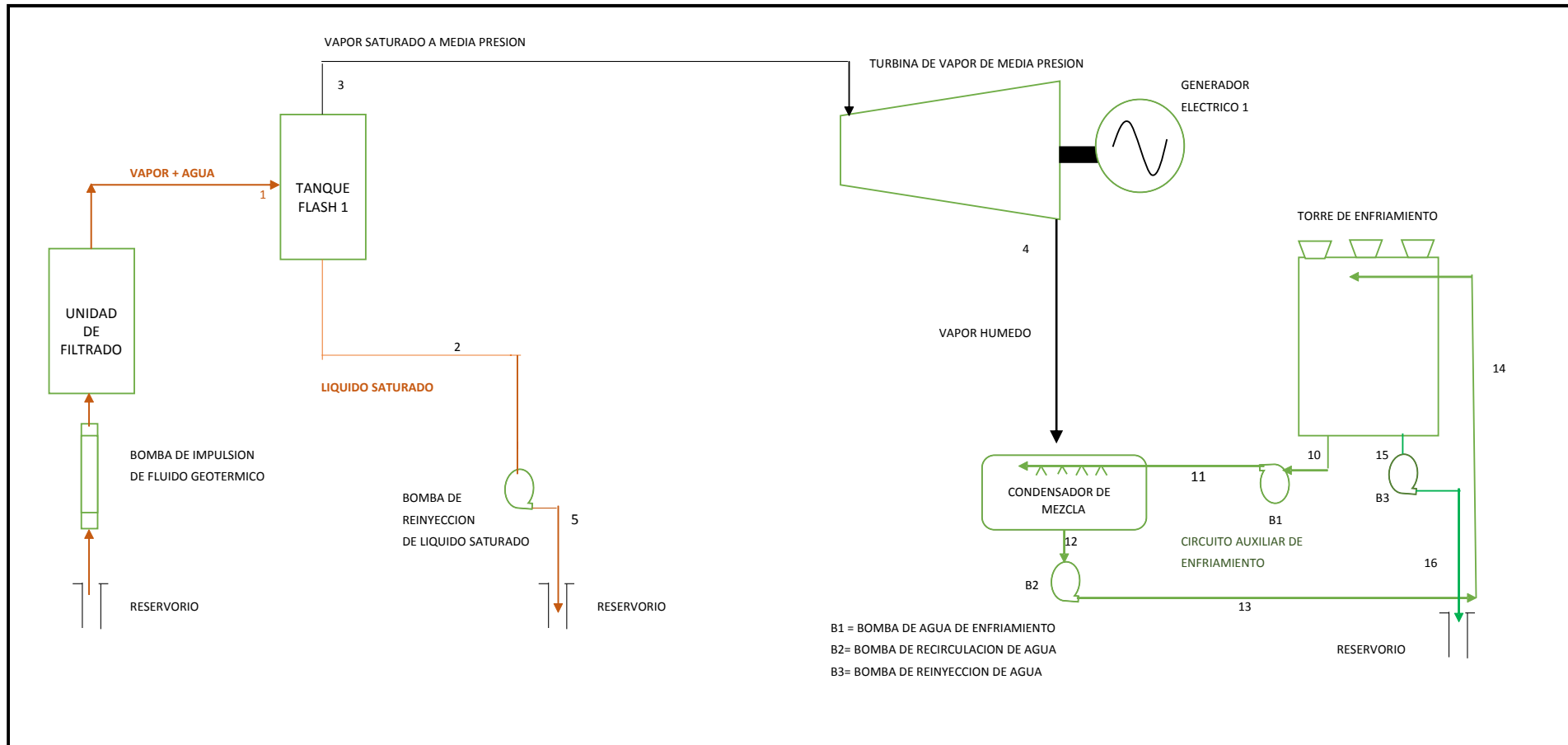
$$\dot{m}_4 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \dots \dots \dots (6)$$

Para el balance de energía se cumple:

$$\dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_{11} * h_{11} = \dot{m}_{12} * h_{12} \dots \dots \dots (7)$$

Figura 23

Distribución de componentes de central geotérmica de destello de única expansión



Nota. Se ha esquematizado los componentes principales para el balance de energía en una central geotérmica de destello de expansión única o simple, la cual va acoplada a una turbina de vapor que opera con una presión de descarga de 1 bar de presión.

Para la caracterización de un sistema de expansión doble.

Para la figura 24 se cumple:

Para el separador 1:

Balance de masas.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \dots \dots \dots (8)$$

Balance de energía.

$$\dot{m}_1 * h_1 = \dot{m}_2 * h_2 + \dot{m}_3 * h_3 \dots \dots \dots (9)$$

La potencia efectiva generada por la turbina de vapor de media presión:

Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$P_{TVMP} = \dot{m}_2 * (h_2 - h_6) * \eta_{TV} \dots \dots \dots (10)$$

Dónde:

\dot{m}_2 = Flujo de vapor generado por hora en media presión.

$(h_2 - h_6)$ =Variación de entalpía de vapor a la entrada y salida de la turbina de vapor de media presión.

η_{TV} = Eficiencia de la turbina de vapor de media presión.

Para la potencia de energía eléctrica generada en media presión P_{GEMP} se tiene la siguiente ecuación:

$$P_{GEMP} = P_{TVMP} * \eta_{GE} \dots \dots \dots (11)$$

Dónde:

η_{GE} = Eficiencia del generador eléctrico.

Para el separador 2:

Balance de masas.

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \dots \dots \dots (12)$$

Balance de energía.

$$\dot{m}_3 * h_3 = \dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_5 * h_5 \dots \dots \dots (13)$$

Luego el punto 7, es un punto de mezcla entre los flujos masicos 4 y 6.

$$\text{Si } \dot{m}_6 = \dot{m}_2 \dots \dots \dots (14)$$

Balance de masa:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_2 \dots \dots \dots (15)$$

Balance de energía:

$$\dot{m}_7 * h_7 = \dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_2 * h_6 \dots \dots \dots (16)$$

La potencia efectiva generada por la turbina de vapor de baja presión:

Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$P_{TVBP} = \dot{m}_7 * (h_7 - h_8) * \eta_{TV} \dots \dots \dots (17)$$

Dónde:

\dot{m}_7 = Flujo de vapor generado por hora en turbina de baja presión.

$(h_7 - h_8)$ =Variación de entalpía de vapor a la entrada y salida de la turbina de vapor de baja presión.

η_{TV} = Eficiencia de la turbina de vapor de baja presión.

Para la potencia de energía eléctrica generada en baja presión P_{GEBP} se tiene la siguiente ecuación:

$$P_{GEBP} = P_{TVBP} * \eta_{GE} \dots \dots \dots (18)$$

Dónde:

η_{GE} = Eficiencia del generador eléctrico.

Para el balance de masa y energía en el condensador de contacto.

Para el balance de masa se cumple:

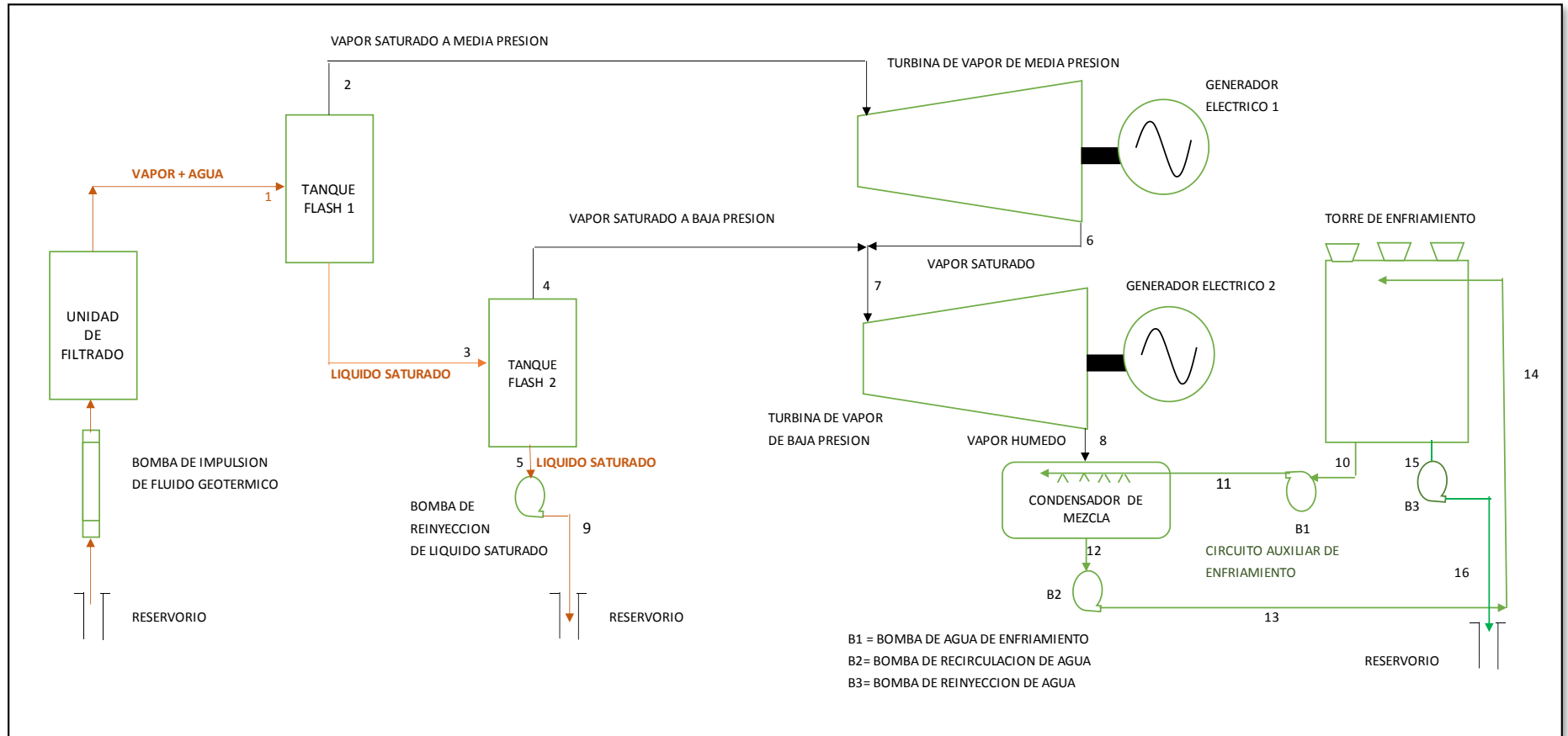
$$\dot{m}_8 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \dots \dots \dots (19)$$

Para el balance de energía se cumple:

$$\dot{m}_8 * h_8 + \dot{m}_{11} * h_{11} = \dot{m}_{12} * h_{12} \dots \dots \dots (20)$$

Figura 24

Distribución de componentes de central geotérmica de destello de doble expansión



Nota. Se ha esquematizado los componentes principales para el balance de energía en una central geotérmica de destello de expansión doble, la cual se caracteriza por tener dos tanques flash en cascada.

Para la determinación del costo nivelado de generación. LCOE.

Fórmula general (discreta, periodo anual):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

donde:

- C_t = costo total en el año t (CAPEX en $t = 0$; OPEX, combustible, reinversiones, impuestos en $t \geq 1$).
- E_t = energía generada en el año t (kWh o MWh).
- r = tasa de descuento (costo de capital).
- n = vida útil del proyecto (años).

Factor de valor presente (anualidad):

$$PV_costos = CAPEX + OPEX \cdot F + \sum \frac{Reinversiones_i}{(1+r)^{t_i}} - \frac{Salvage}{(1+r)^n}$$

$$PV_energia = E_{ann} \cdot F$$

$$LCOE = \frac{PV_costos}{PV_energia}$$

Del mismo se tienen los valores referenciales de Centrales de destello existentes con las cuales se realizarán las comparaciones entre los valores óptimos hallados con valores de centrales reales en operación en otros países que tienen implementada la presente tecnología.

Tabla 2

Valor del LCOE para países donde se cuenta con centrales geotérmicas de destello.

País / Región	Contexto / Planta (tipo)	LCOE estimado (USD / MWh)	Fuente / nota
México	Plantas flash y expansión (Cerro Prieto, Los Azufres — referencias nacionales)	≈ 57 – 84 USD/MWh (rango típico para flash).	Informe técnico NREL sobre mercado mexicano (revisión de costos LCOE para flash). (NREL)
Costa Rica	Campo Miravalles (doble-flash / expansión de unidades)	~ 50 – 80 USD/MWh (plantas de doble flash y expansión en campos con buen recurso).	Estudios regionales y análisis comparativos de Latam; rangos concordantes con estudios de la región. (Esmap)
Estados Unidos (The Geysers)	Vapor seco / campos maduros (ampliaciones históricas)	~ 40 – 70 USD/MWh (campos maduros con infraestructura reducen LCOE).	Análisis de NREL / ATB y revisiones históricas del sector geotérmico en EE. UU. (ATB)
Islandia (proyectos flash / naturales)	Plantas sobre reservorios de alta entalpía	~ 30 – 60 USD/MWh (entre los más bajos del mundo por recurso excepcional).	Estudios de caso y análisis de ciclo de vida para plantas islandesas (Reykjanes, etc.). (Opiné)
Filipinas / Indonesia	Plantas flash (países con gran experiencia en geotermia)	~ 50 – 110 USD/MWh (amplio rango según sitio y riesgo de perforación).	Informes regionales y análisis de casos (Indonesia, Filipinas) que muestran variabilidad por riesgo y financiamiento. (IESR)
Región LATAM — promedio / estimación para proyectos de expansión	Plantas de expansión (buen recurso y acceso)	~ 40 – 90 USD/MWh (depende de CAPEX pozos y factor de planta)	World Bank / CSIS / IRENA: rangos aplicables a proyectos de América Latina. (World Bank)
Perú	(No hay plantas geotérmicas de escala comercial en operación para comparar LCOE de expansión)	No disponible públicamente — usar rango regional ~ 50–100 USD/MWh como proxy si se planifica expansión en campo favorable	Estudios exploratorios locales/INGEMMET indican potencial, pero no datos de LCOE operativos; usar estimados regionales y análisis de sensibilidad. (Ingemmet)

Nota. Si bien es cierto no existen plantas geotérmicas en el Perú, según estudios de INGEMMET el valor del LCOE varía entre 50 a 100 U\$/MWh, el cual posee en rango amplio en función a diversos factores, siendo el principal el flujo másico de agua geotermal.

3.7 Técnicas de análisis de resultados:

Técnicas:

En la investigación y el análisis de la información datos se hizo uso de herramientas estadísticas descriptivas para relacionar las variables de estudio.

Análisis estadístico descriptivo.

En el caso de la estadística de análisis descriptivo, este tipo de metodología proporciona un enfoque por el que se confecciona un resumen de información que dan los datos de una muestra. Es decir, su meta es hacer síntesis de la información para arrojar precisión, sencillez y aclarar y ordenar los datos. Se hizo uso de histogramas y cuadros de distribución absoluta que nos permitirá estimar la potencia efectiva máxima de la central geotérmica de destello, según la determinación de la presión o presiones intermedias de expansión del vapor geotermal.

Análisis de los Resultados:

Recolección de datos documentales: Se consultaron informes técnicos del yacimiento Covire y se obtendrán datos estándar del diseño de centrales geotérmicas de destello.

Desarrollo del modelo termodinámico: Se modelizo los sistemas de obtención de vapor geotermal con una y dos separadores o depósitos de expansión y se procederá a realizar un balance de energía, según las presiones intermedias en los separadores para conocer la fracción de aprovechamiento del agua geotermal en vapor geotermal.

Análisis del comportamiento del sistema energético: Se simulo diferentes presiones de expansión para el vapor y se calcula la potencia neta para cada caso.

Se determino los valores de potencia efectiva de la central geotérmica de destello en funciones a las limitantes técnicas de las turbinas de vapor.

Se organizo los resultados en tablas, gráficos de presión vs. potencia y presión vs. eficiencia. Se interpreto el comportamiento del sistema y se determinó condiciones óptimas.

Se hizo uso de hojas electrónicas EXCEL para los cálculos de los capítulos previstos en este informe. El informe se redactó teniendo en cuenta lo detallado en el Reglamento de grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, la cual se realizó a través del procesador de textos WORD:

IV. Resultados y discusión.

4.1 Estimación de las presiones intermedias.

a. Flujo masico disponible de Covire:

Para la determinación del flujo masico disponible del yacimiento de Covire. Se tiene en consideración a la información de Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de las zonas geotermales de Covire, Ancocollo y Vilacota, región Tacna, de INGEMMET 2024. (Ver Anexo 1)

Para la zona geotermal de Covire:

Area= 20 km²

Espesor o altura= 1 300 metros.

Vida útil= 30 años.

Temperatura del reservorio= 220 °C.

Porosidad=0,15

Densidad= 887,3 kg/m³

Profundidad de medición (h) = 1 000 metros.

Primero se calculó el volumen del reservorio geotérmico (V):

$$V = \frac{20 \text{ km}^2 \times 1\,300 \text{ m} \times 100^2 \text{ m}^2}{1 \text{ km}^2} = 26 \times 10^7 \text{ m}^3$$

Luego se considera la porosidad de la roca, para determinar el fluido disponible:

$$V_d = 26 \times 10^7 \text{ m}^3 \times \text{Porosidad} = 26 \times 10^7 \text{ m}^3 \times 0,15 = 39 \times 10^6 \text{ m}^3$$

El caudal que puede producirse en función a la vida útil que se quiere explotar el campo geotérmico.

$$V_d = \frac{39 \times 10^6 \text{ m}^3}{30 \text{ años} \times \frac{8\,760 \text{ h}}{\text{años}} \times \frac{3\,600 \text{ s}}{1 \text{ h}}} = 0,0412 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El flujo masico disponible es:

$$\dot{m}_c = 0,0412 \times 887,3 = 36,55 \frac{kg}{s}$$

b. Presión del reservorio de Covire:

Para determinar la presión del reservorio se tiene el siguiente calculo:

$$P = \rho \times g \times h$$

$$P = \frac{887,3 \times 9,81 \times 1\ 000}{10^5} = 87 \text{ Bar}$$

Se asume una caída de presión antes de llegar al 1 tanque de expansión y luego del proceso de limpieza del agua geotérmica, por lo tanto, la presión de 78 bar es el valor de llegada del agua geotermal a la superficie.

Con una temperatura de 220 °C y a la presión de 78 bar , el agua geotermal se encuentra en estado de líquido comprimido, el cual debe ser expandido debe alcanzar el estado de líquido saturado.

c. Flujo masico disponible de Ancocollo:

Para la zona geotermal de Ancocollo:

Area media= 24 km²

Espesor o altura= 1 600 metros.

Vida útil= 30 años.

Temperatura del reservorio= 240 °C.

Porosidad=0,15

Densidad= 887,3 kg/m³

Profundidad de medición (h) = 1 000 metros.

Primero se calculó el volumen del reservorio geotérmico (V):

$$V = \frac{24 \text{ km}^2 \times 1\ 600 \text{ m} \times 100^2 \text{ m}^2}{1 \text{ km}^2} = 38,4 \times 10^7 \text{ m}^3$$

Luego se considera la porosidad de la roca, para determinar el fluido disponible:

$$V_d = 38,4 \times 10^7 \text{ m}^3 \times \text{Porosidad} = 38,4 \times 10^7 \text{ m}^3 \times 0,15 = 57,6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

El caudal que puede producirse en función a la vida útil que se quiere explotar el campo geotérmico.

$$V_d = \frac{57,6 \times 10^6 \text{ m}^3}{30 \text{ años} \times \frac{8760 \text{ h}}{\text{años}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}} = 0,0608 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El flujo masico disponible es:

$$\dot{m}_a = 0,0608 \times 887,3 = 53,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

d. Condiciones finales de uso del agua geotermal:

La temperatura final del agua termal en función a los flujos masicos de los reservorios de Covire y Ancocollo y sus respectivas temperaturas es:

$$\dot{m}_T \times T_m = \dot{m}_c \times T_c + \dot{m}_a \times T_a$$

$$(36,55 + 53,94) \times T_m = 36,55 \times 220 + 53,94 \times 240$$

$$T_m = 231,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En función a la temperatura de la mezcla la presión de saturación a la temperatura de 231,9 °C es de 27 bar (de tablas de vapor), la cual será la presión de ingreso al 1 tanque de expansión.

La presión de salida del vapor saliente de la turbina de vapor típica es de 1, 0,5 y 0,1 bar, que es el punto de entrada en el condensador de mezcla, además la humedad máxima permitida es de 12 % y el rendimiento de la turbina de vapor es de 90%.

4.2 Evaluación de una central geotérmica de destello de expansión simple.

Teniendo en cuenta la figura 24 y las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, se plantea valores de presiones intermedias de expansión en el separador 1 desde 20, 18,16,14,12,10,8, 6,4,2, 1 bar.

Se presenta el ejemplo para:

Presión intermedia 2 bar.

Presión de salida desde la turbina de vapor 0,1 bar.

$$\dot{m}_1 = (36,55 + 53,94) \text{ kg/s} = 90,44 \text{ kg/s.}$$

$$h_1 = 981,2 \text{ kJ/kg. (liquido saturado a 27 bar)}$$

$$h_2 = 504,7 \text{ kJ/kg. (liquido saturado a 2 bar)}$$

$$h_3 = 2706,3 \text{ kJ/kg. (vapor saturado a 2 bar)}$$

La ecuación 1 modificado es:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_3$$

La ecuación 2 modificado es:

$$\dot{m}_1 * h_1 = ((\dot{m}_1 - \dot{m}_3) * h_2) + (\dot{m}_3 * h_3)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 x \frac{h_1 - h_2}{h_3 - h_2}$$

Reemplazando valores:

$$\dot{m}_3 = 19,57 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{es el flujo masico que ingresara a la turbina de vapor}$$

$$\dot{m}_2 = 70,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{es el flujo masico de liquido saturado}$$

Para evaluar las condiciones de ingreso a la turbina de vapor se cumple que:

$$s_3 = 7,1268 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C. (entropía especifica como vapor saturado a 2 bar)}$$

A la salida de la turbina de vapor en un proceso isoentrópico.

$$s_3 = s_4$$

De tablas de vapor a una presión de 0,1 bar en un proceso isoentrópico las siguientes propiedades:

$$h_{4i} = 2\,261,7 \text{ kJ/kg.}$$

$$X_i = 0,865 \text{ (86,5\%)}$$

Teniendo en cuenta la eficiencia de la turbina de vapor de 90%, se determina el valor de la entalpia especifica real a la salida de la turbina de vapor.

$$\eta = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4i}} \times 100\%$$

Reemplazando datos tenemos que el valor final de real de la entalpia especifica es:

$$h_4 = 2\,306,16 \text{ kJ/kg}$$

El valor de la calidad de la entalpia especifica real a la salida de la turbina de vapor h_4 es:

$X = 0,884$ (88,4%) Valor técnico del vapor húmedo admitido en los últimos escalonamientos de la turbina, la cual mínimamente es 88%.

La potencia efectiva generada por la turbina de vapor es igual a:

$$P_{TV} = 19,57 * (2\,706,3 - 2\,306,16)$$

$$P_{TV} = 7\,830 \text{ kW} = 7,83 \text{ MW}$$

Considerando una eficiencia del generador eléctrico, la potencia de energía eléctrica generada P_{GE} se determina con la ecuación 4.

$$P_{GE} = 7,83 * 0,9 = 7,048 \text{ MW}$$

Se presentan los resultados de los cálculos de los diversos resultados de determinación de las potencias efectivas para los siguientes casos:

Tabla 3

Valores obtenidos de presión para central de destello de expansión simple

Presión de expansión en Tanque flash	Presión de expansión turbina de vapor (bar)		
	0,1	0,5	1
	20	20	20
	19	19	19
	18	18	18
	17	17	17
	16	16	16
	15	15	15
	14	14	14
	13	13	13
	12	12	12
	11	11	11
	10	10	10
	9	9	9
	8	8	8
	7	7	7
	6	6	6
	5	5	5
	4	4	4
	3	3	3
2	2	2	
1	1	1	

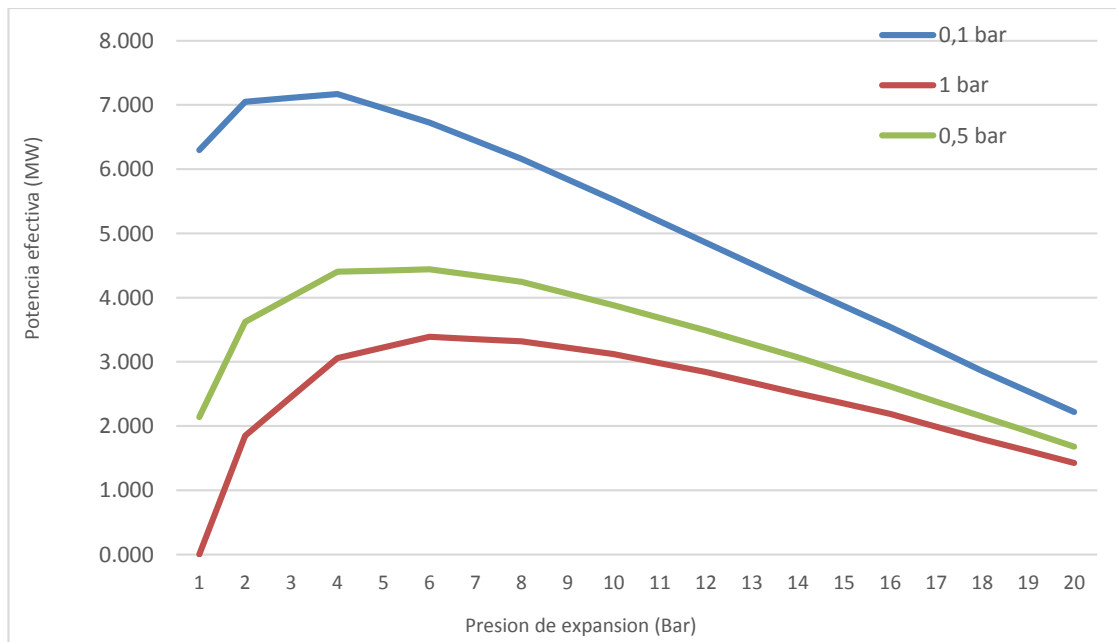
Nota. En la tabla anterior se detallan los valores de la presión de expansión dentro del tanque flash, teniendo en cuenta que la presión de ingreso al tanque flash es de 27 bar, se han realizado un total de 20 soluciones para los casos en los cuales la presión a la salida de la turbina de vapor es de 0,1, 0,5 y 1 bar de presión.

En la siguiente figura se presentan las 59 soluciones obtenidas para una central geotérmica de destello único, en el cual se puede observar que las soluciones con una presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1 Bar presentan un mayor valor en sus resultados de potencia efectiva, seguido por las soluciones de una presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar. Por ejemplo, para la presión de descarga de 0,1 bar se alcanza un valor máximo de potencia efectiva de 7,17 MW con un valor de la presión de expansión de 4 bar, mientras que para el caso la presión de descarga de 0,5 bar se alcanza un valor máximo de potencia efectiva de 4,441 MW con un valor de la presión de expansión de 6 bar y para la presión de descarga de 1 bar se alcanza un valor máximo de potencia efectiva de 3,389 MW con un valor de la presión de expansión de 6 bar.

En los casos de los resultados con una presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1 y 0,5 bar, el condensador sería el de tipo indirecto, mientras que para el caso de una presión de descarga de 1 bar, el condensador sería del tipo mezcla tal como se representa en la figura 21.

Figura 25

Resultados de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión simple



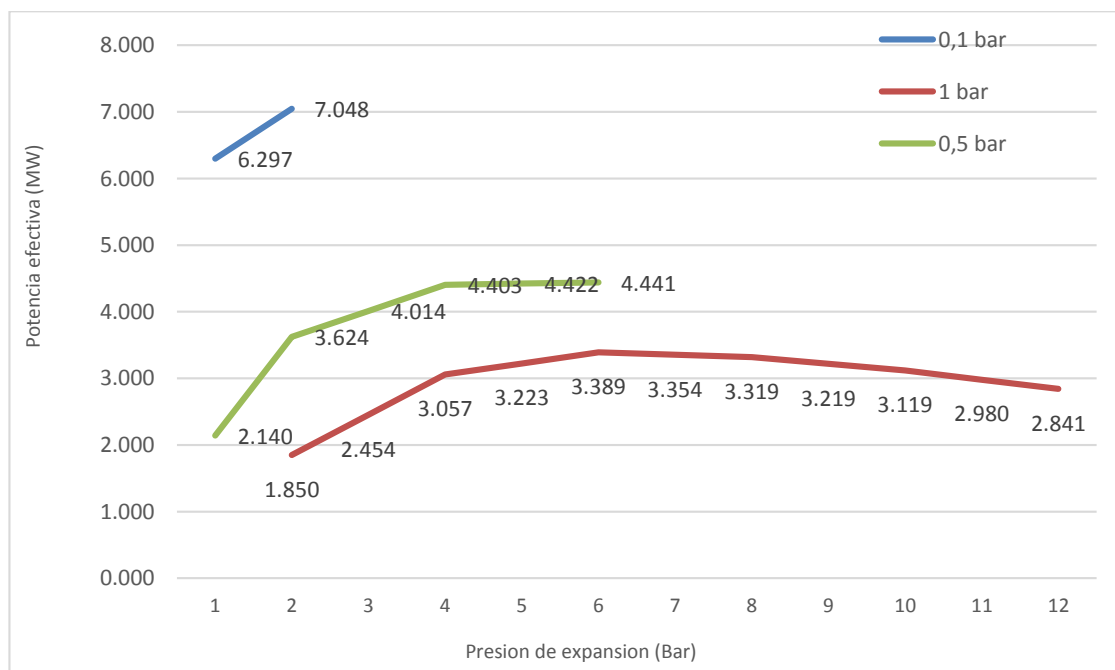
Nota. En la figura anterior se representan los valores de las potencias efectivas obtenidas para los casos analizados, donde se observa que la potencia efectiva a valores de presión de expansión pequeños las potencias efectivas obtenidas son bajas y van incrementándose

hasta un valor máximo (para cada caso de la presión de descarga en la turbina de vapor) y luego se van reduciendo a medida que la presión de expansión se incrementa.

Teniendo en cuenta la restricción en la turbina de vapor que técnicamente admite una calidad mínima de 88%, se presentan los resultados de las soluciones que cumplen con el criterio técnico mencionado.

Figura 26

Resultados finales de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión simple



Nota. En la figura anterior se representan los valores de las potencias efectivas técnicamente viables para los casos analizados, donde se observa que se han obtenido 19 casos que cumplen con la restricción de la turbina de vapor.

Así tenemos que para el caso de la presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1 bar se obtienen 2 soluciones con 1 y 2 bares de presión de expansión con potencias efectivas de 6,297 y 7,048 MW.

Para el caso de la presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar se obtienen 6 soluciones desde 1 a 6 bares de presión de expansión con potencias efectivas de 2,14 a 4,441 MW respectivamente.

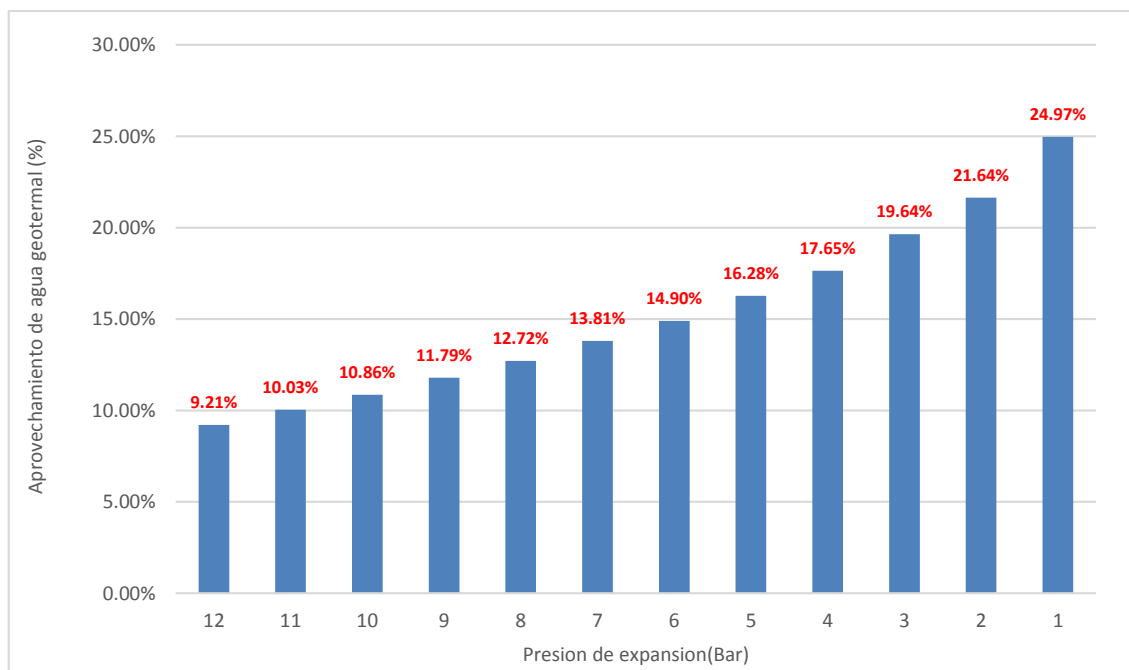
Para el caso de la presión de descarga de la turbina de vapor 1 bar se obtienen 11 soluciones desde 2 a 12 bares de presión de expansión con potencias efectivas de 1,85 a 2,841 MW respectivamente.

Con lo cual tan solo 19 son soluciones técnicas viables de los 59 casos realizados.

Se presentan los resultados de la relación de aprovechamiento del fluido geotérmico con la potencia efectiva generada, en este caso el grado de aprovechamiento esta referida a la relación entre el flujo de vapor generado en el tanque de expansión y el flujo total de agua geotermal (90,44 kg/s).

Figura 27

Relación de aprovechamiento del agua geotermal según la presión de expansión en el tanque flash.



Nota. En la figura anterior se representan en porcentaje la fracción de masa que se recupera en forma de vapor saturado de los 90,44 kg/s disponibles de agua geotermal. Se puede observar que la fracción de recuperación de incrementa a medida que la presión de expansión en el tanque flash se reduce. Así tenemos que para una presión de descarga de 0,1 bar la máxima potencia efectiva se obtiene es de 7,048 MW a 2 bar con un aprovechamiento del 21,6%. Para el caso de la presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar se obtienen la máxima potencia a 4,441 MW a 6 bar de presión con una recuperación de 14,9 %. Para el caso de la presión de descarga de la turbina de vapor de 1

bar se obtienen la máxima potencia a 3,389 MW a 6 bar de presión con una recuperación de 14,9 %.

4.3 Evaluación de una central geotérmica de destello de expansión doble.

Se presentan los siguientes casos evaluados:

Tabla 4

Valores obtenidos de presión para central de destello de expansión doble

		Presión de expansión en el tanque flash 2(bar)															
		16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5		4	3	2
Presión de expansión en el tanque flash 1 (bar)	20																Presión de expansión turbina de vapor (bar)
	18																
	16																
	14																
	12																0,1/0,5/1 (bar)
	10																
	8																
	6																

Nota. En la tabla anterior se detallan los valores de la presión de expansión dentro del tanque flash 1 y tanque flash 2, teniendo en cuenta que la presión de ingreso al tanque flash es de 27 bar, se han realizado un total de 216 soluciones para los casos en los cuales la presión a la salida de la turbina de vapor es de 0,1, 0,5 y 1 bar de presión.

Teniendo en cuenta la figura 22 se presentan los cálculos para el caso con los siguientes valores:

Presión en el tanque flash 1: 10 bar.

Presión en el tanque flash 2: 3 bar.

Presión de salida desde la turbina de vapor 1 bar.

$$\dot{m}_1 = 90,44 \text{ kg/s.}$$

$$h_1 = 981,2 \text{ kJ/kg. (liquido saturado a 27 bar)}$$

$$h_3 = 908,6 \text{ kJ/kg. (liquido saturado a 10 bar)}$$

$$h_2 = 2797,2 \text{ kJ/kg. (vapor saturado a 10 bar)}$$

La ecuación 1 modificado es:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$$

La ecuación 2 modificado es:

$$\dot{m}_1 * h_1 = ((\dot{m}_1 - \dot{m}_2) * h_3) + (\dot{m}_2 * h_2)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 x \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_3}$$

Reemplazando valores:

\dot{m}_2

$= 9,82 \frac{kg}{s}$ es el flujo masico de vapor ingresante a la turbina de vapor de media presion

$\dot{m}_3 = 82,11 \frac{kg}{s}$ es el flujo masico de liquido saturado ingresante al 2 tanque flash.

Para evaluar las condiciones de ingreso a la turbina de vapor de media presión se cumple que:

$$s_2 = 6,5828 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C. (entropía específica como vapor saturado a 10 bar)}$$

A la salida de la turbina de vapor en un proceso isoentrópico.

$$s_3 = s_6$$

De tablas de vapor a una presión de 2 bar en un proceso isoentrópico las siguientes propiedades:

$$h_{6i} = 2\,558,1 \text{ kJ/kg.}$$

$$X_{6i} = 0,911 \text{ (91,1\%)}$$

Teniendo en cuenta la eficiencia de la turbina de vapor de 90%, se determina el valor de la entalpia específica real a la salida de la turbina de vapor de media presión.

$$\eta_{TVMP} = \frac{h_2 - h_6}{h_2 - h_{6i}} \times 100\%$$

Reemplazando datos tenemos que el valor final de real de la entalpia especifica es:

$$h_6 = 2\,579,91 \text{ kJ/kg}$$

El valor de la calidad de la entalpia especifica real a la salida de la turbina de vapor h_6 es:
 $X = 0,923$ (92,3%) Valor técnico del vapor húmedo admitido en los últimos escalonamientos de la turbina, la cual mínimamente es 88%.

La potencia efectiva generada por la turbina de vapor es igual a:

$$P_{TVMP} = 9,82 * (2\,797,2 - 2\,579,91)$$

$$P_{TVMP} = 1\,927,57 \text{ kW} = 1,927 \text{ MW}$$

Considerando una eficiencia del generador eléctrico, la potencia de energía eléctrica generada P_{GE} se determina con la ecuación 4.

$$P_{GEMP} = 1,927 * 0,9 = 1,735 \text{ MW}$$

Para el tanque flash 2:

Balance de masas según la ecuación 12:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3 - \dot{m}_4$$

Balance de energía según la ecuación 13:

$$\dot{m}_3 * h_3 = \dot{m}_4 * h_4 + (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) * h_5$$

$$h_3 = 908,6 \text{ kJ/kg. (liquido saturado a 10 bar)}$$

$h_4 = 2\,724,7 \text{ kJ/kg}$. (vapor saturado a 2 bar)

$h_5 = 561,4 \text{ kJ/kg}$. (liquido saturado a 2 bar)

Reemplazando valores:

\dot{m}_4

$= 7,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ es el flujo masico de vapor saturado saliente del 2 tanque flash

\dot{m}_5

$= 73,12 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ es el flujo masico de liquido saturado saliente del 2 tanque flash.

Luego el punto 7, es un punto de mezcla entre los flujos masicos 2 y 6.

$$\text{Si } \dot{m}_6 = \dot{m}_2 \dots \dots \dots (14)$$

Balance de masa:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_2 = 17,32 \text{ kg/s}$$

Balance de energía según la ecuación 16 y reemplazando valores se obtiene el valor de la entalpia especifica en el punto 7 de mezcla.

$$\dot{m}_7 * h_7 = \dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_2 * h_6 \dots \dots \dots (16)$$

$$h_7 = 2\,642,61 \text{ kJ/kg}$$

Para evaluar las condiciones de ingreso a la turbina de vapor de baja presión se cumple que:

$s_7 = 6,788 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$. (entropía especifica según el valor de la entalpia especifica en el punto 7 a 8 bar)

A la salida de la turbina de vapor de baja presión en un proceso isoentrópico.

$$s_7 = s_8$$

De tablas de vapor a una presión de 1 bar en un proceso isoentrópico se tienen las siguientes propiedades:

$$h_{8i} = 2\,458,6 \text{ kJ/kg}$$

$$X_{8i} = 0,904 \text{ (90,4\%)}$$

Teniendo en cuenta la eficiencia de la turbina de vapor de 90%, se determina el valor de la entalpia especifica real a la salida de la turbina de vapor de baja presión.

$$\eta_{TVBP} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8i}} \times 100\%$$

Reemplazando datos tenemos que el valor final de real de la entalpia especifica es:

$$h_8 = 2\,477.0 \text{ kJ/kg}$$

El valor de la calidad de la entalpia especifica real a la salida de la turbina de vapor de baja presión h_8 es:

$X_8 = 0,914$ (91,4%) Valor técnico del vapor húmedo admitido en los últimos escalonamientos de la turbina, la cual mínimamente es 88%.

La potencia efectiva generada por la turbina de vapor de baja presión se determina empleando la ecuación 17 y reemplazando valores se tiene el siguiente resultado:

$$P_{TVBP} = 2\,868,37 \text{ kW} = 2,868 \text{ MW}$$

Para hallar la potencia de energía eléctrica generada en baja presión P_{GEBP} se utiliza la ecuación 18 con el siguiente resultado:

$$P_{GEBP} = 2,868 \times 0,9 = 2,58 \text{ MW}$$

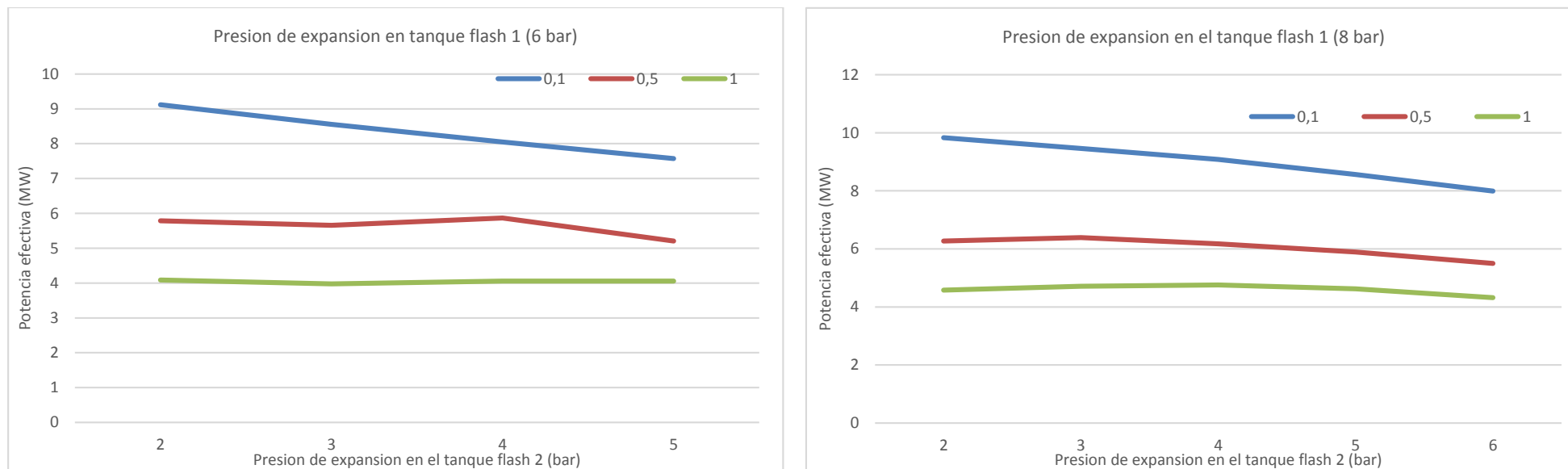
Finalmente, la potencia efectiva obtenida de la central geotérmica de doble destallo es igual a:

$$P_{GEAP} + P_{GEBP} = 4,315 \text{ MW}$$

Se presentan los resultados según la tabla 4:

Figura 28

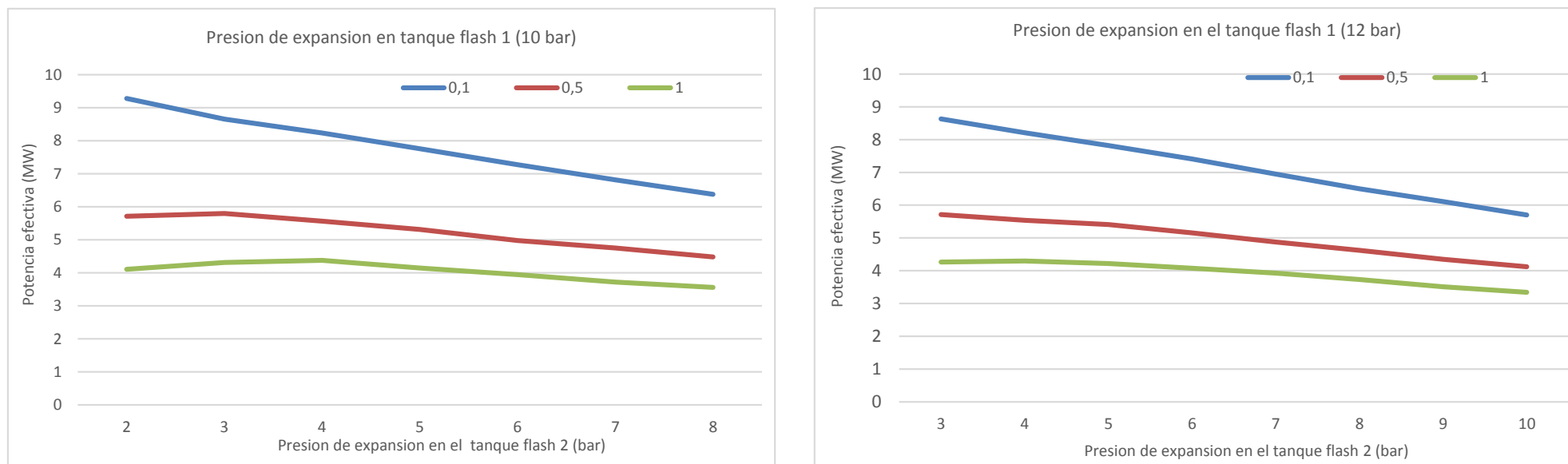
Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 6 y 8 bar.



Nota. Para el caso de tener una presión de expansión en el tanque flash 1 de 6 y 8 bar respectivamente se obtiene una mayor potencia efectiva con una presión al final de la turbina de vapor igual a 0,1 bar y menor potencia efectiva con 1 bar de presión. Para una presión de expansión de 6 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 9,119 MW, 5,789 MW y 4,089 MW para presión de expansión en el tanque flash 2 de 2 bar y presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar. Para una presión de expansión de 8 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 9,83 MW (presión en el tanque flash 2 de 2 bar), 6,392 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar) y 4,754 MW (presión en el tanque flash 2 de 4 bar) para presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar respectivamente.

Figura 29

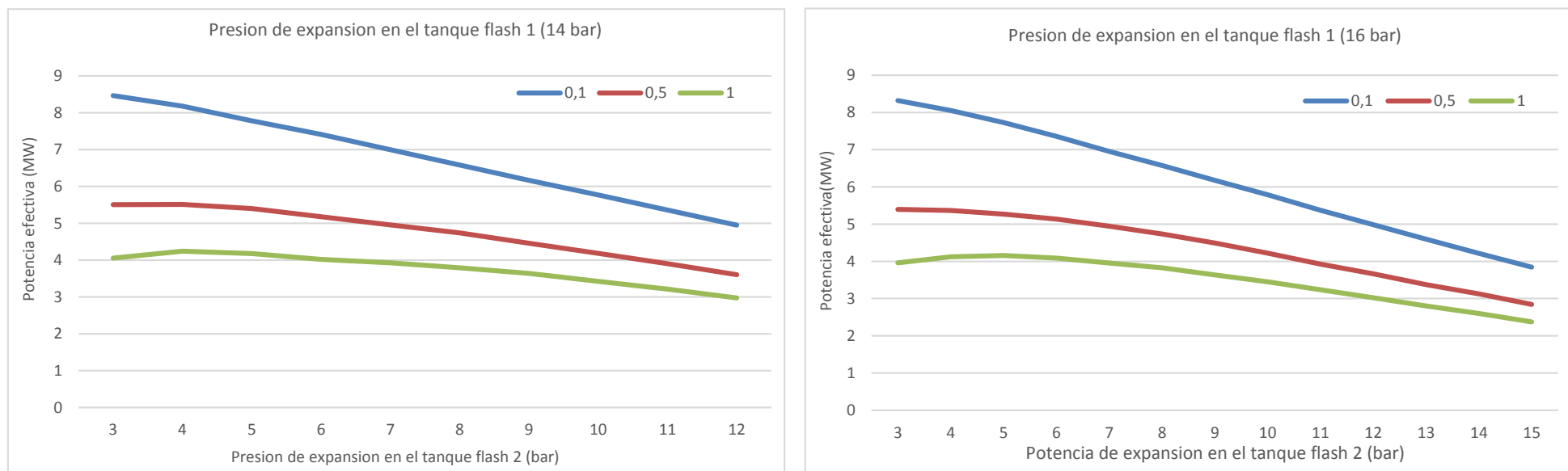
Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 10 y 12 bar.



Nota. Para el caso de tener una presión de expansión en el tanque flash 1 de 10 y 12 bar respectivamente se obtiene una mayor potencia efectiva con una presión al final de la turbina de vapor igual a 0,1 bar y menor potencia efectiva con 1 bar de presión. Para una presión de expansión de 10 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 9,28 MW (presión en el tanque flash 2 de 2 bar), 5,795 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar) y 4,377 MW (presión en el tanque flash 2 de 4 bar) y presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar. Para una presión de expansión de 12 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 8,634 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar), 5,714 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar) y 4,299 MW (presión en el tanque flash 2 de 4 bar) y para presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar respectivamente.

Figura 30

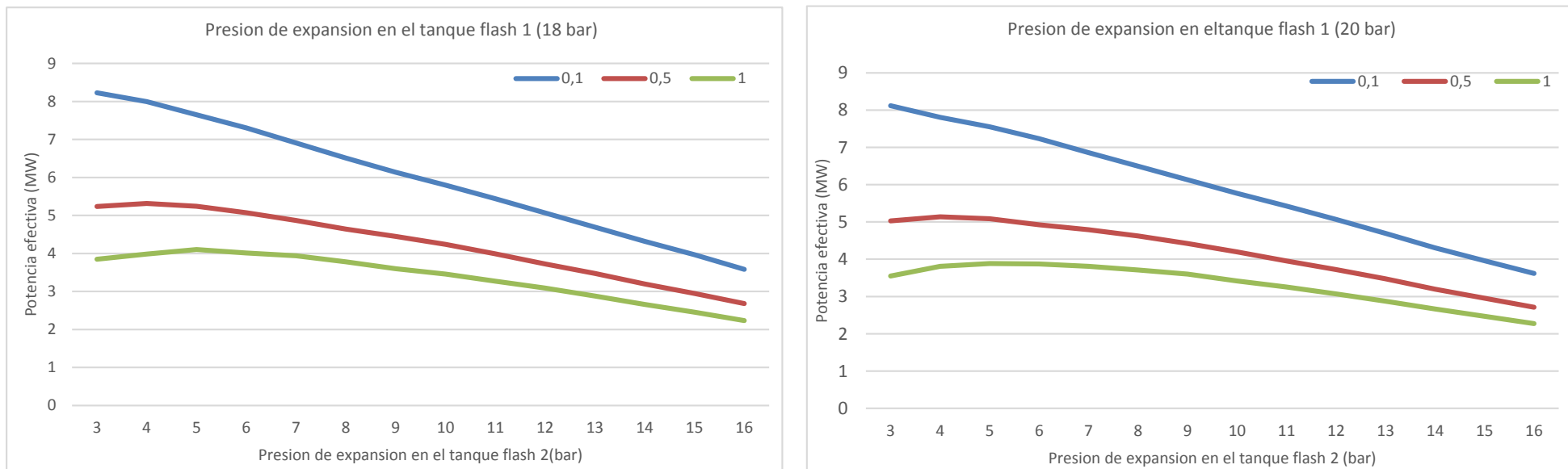
Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 14 y 16 bar.



Nota. Para el caso de tener una presión de expansión en el tanque flash 1 de 14 y 16 bar respectivamente se obtiene una mayor potencia efectiva con una presión al final de la turbina de vapor igual a 0,1 bar y menor potencia efectiva con 1 bar de presión. Para una presión de expansión de 14 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 8,466 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar), 5,506 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar) y 4,240 MW (presión en el tanque flash 2 de 4 bar) y presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar. Para una presión de expansión de 16 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 8,318 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar), 5,398 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar) y 4,158 MW (presión en el tanque flash 2 de 5 bar) y para presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar respectivamente.

Figura 31

Potencia efectiva generada con presión de expansión en el tanque flash 1 de 18 y 20 bar.



Nota. Para el caso de tener una presión de expansión en el tanque flash 1 de 18 y 20 bar respectivamente se obtiene una mayor potencia efectiva con una presión al final de la turbina de vapor igual a 0,1 bar y menor potencia efectiva con 1 bar de presión. Para una presión de expansión de 18 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 8,227 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar), 5,316 MW (presión en el tanque flash 2 de 4 bar) y 4,101 MW (presión en el tanque flash 2 de 5 bar) y presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar. Para una presión de expansión de 20 bar en el tanque flash 1, las mayores potencias efectivas conseguidas son de 8,120 MW (presión en el tanque flash 2 de 3 bar), 5,139 MW (presión en el tanque flash 2 de 4 bar) y 3,884 MW (presión en el tanque flash 2 de 5 bar) y para presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar respectivamente.

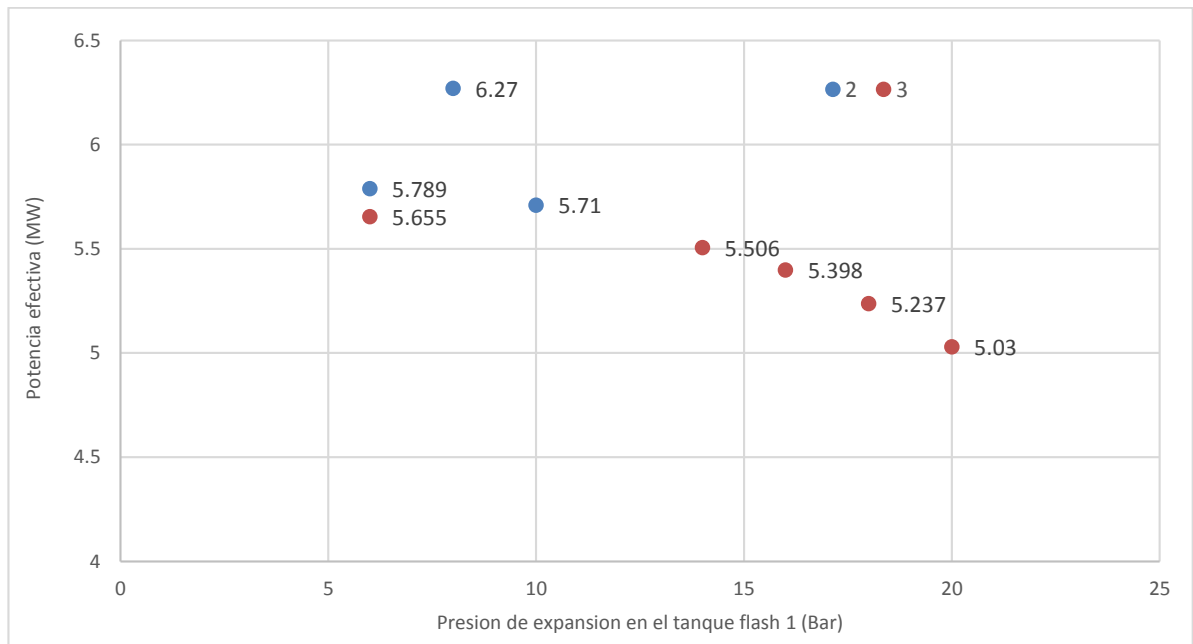
Teniendo en cuenta la restricción en las turbinas de vapor de media y baja presión que técnicamente admite una calidad mínima de 88%, se presentan los resultados de las soluciones que cumplen con el criterio técnico mencionado.

Se presentan resultados solo para las presiones de descarga de la turbina de vapor de 0,5 y 1 bar.

Se tienen los resultados para la presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar.

Figura 32

Resultados finales de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de 0,5 bar de la turbina de vapor



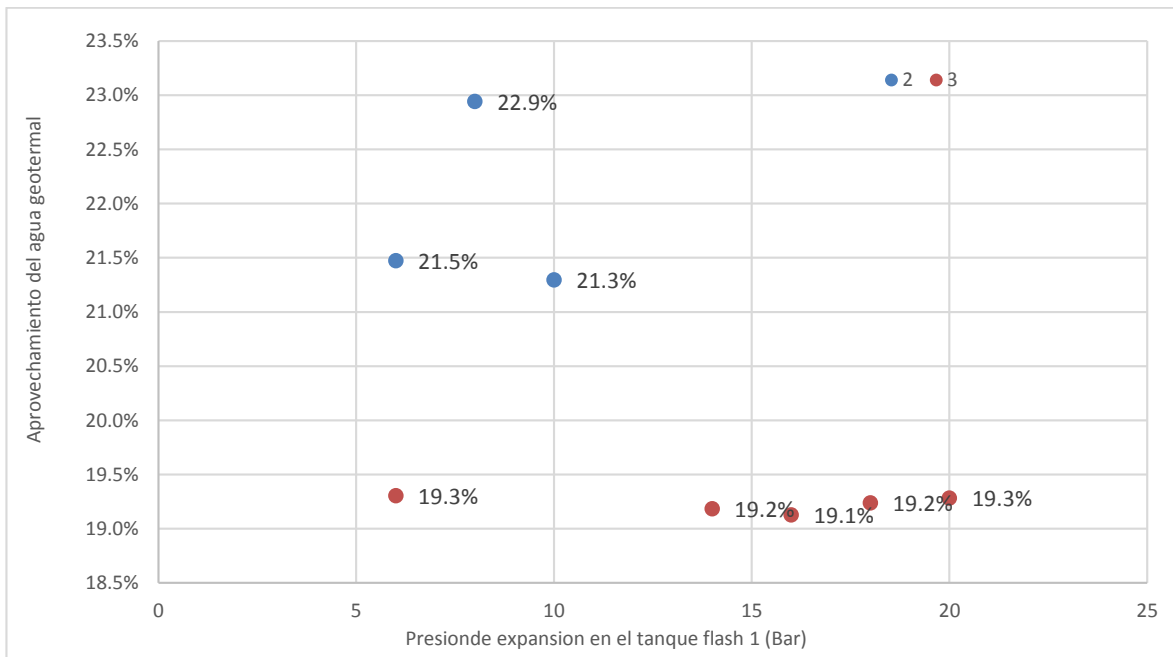
Nota. Para el caso de la presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar se obtienen 8 soluciones con 3 (5 soluciones) y 2 (3 soluciones) bar de presión de expansión con potencias efectivas máximas de 6,27 MW para una presión de 8 bar para el tanque flash 1 y con una presión en el tanque flash 2 de 2 bar. Del mismo modo se tiene una potencia efectiva máxima de 5,655 MW para una presión de 6 bar para el tanque flash 1 y con una presión en el tanque flash 2 de 3 bar.

Con respecto a la figura anterior para la potencia efectiva máxima generada de 6,27 MW para el caso en el cual la presión de expansión en el tanque flash 1 es de 8 bar y la presión de expansión en el tanque flash 2 es de 2 bar se genera 2,6 MW en la turbina de media presión y 3,67 MW en la turbina de baja presión.

Con respecto a la figura anterior para la potencia efectiva máxima generada de 5,655 MW para el caso en el cual la presión de expansión en el tanque flash 1 es de 6 bar y la presión de expansión en el tanque flash 2 es de 3 bar se genera 1,625 MW en la turbina de media presión y 4,03 MW en la turbina de baja presión.

Figura 33

Aprovechamiento del agua geotermal para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión con presión de descarga de 0,5 bar en la turbina de vapor

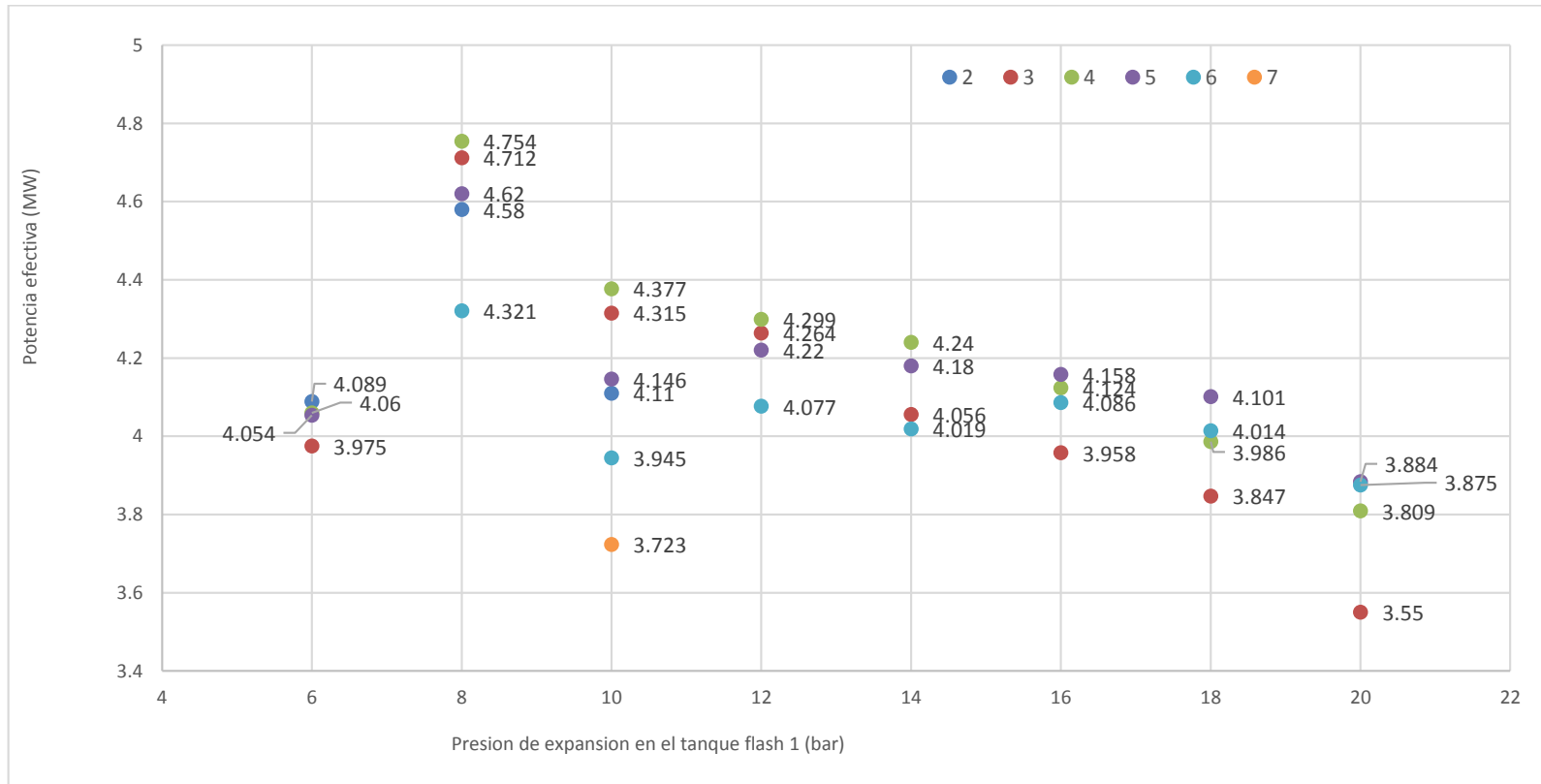


Nota. Se tiene un mayor grado de aprovechamiento del agua geotermal es mayor para el caso de la presión de descarga del tanque flash 2 es de 2 bar y con el cual se alcanza una potencia efectiva de 6,27 MW.

Del mismo modo se presentan los resultados con una presión de descarga de 1 bar de la turbina de vapor.

Figura 34

Resultados finales de la potencia efectiva para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de 1 bar de la turbina de vapor



Nota. Se tienen un total de 35 soluciones para el caso en el cual la presión de descarga de la turbina de vapor es de 1 bar. Concentrándose la mayor parte con valores superiores a 4 MW e inferiores a 4,754 MW de potencia efectiva.

Con respecto a la figura anterior se tiene una potencia efectiva máxima generada de 4,754 MW para el caso en el cual la presión de expansión en el tanque flash 1 es de 8 bar y la presión de expansión en el tanque flash 2 es de 4 bar; generándose 1,554 MW en la turbina de media presión y 3,2 MW en la turbina de baja presión.

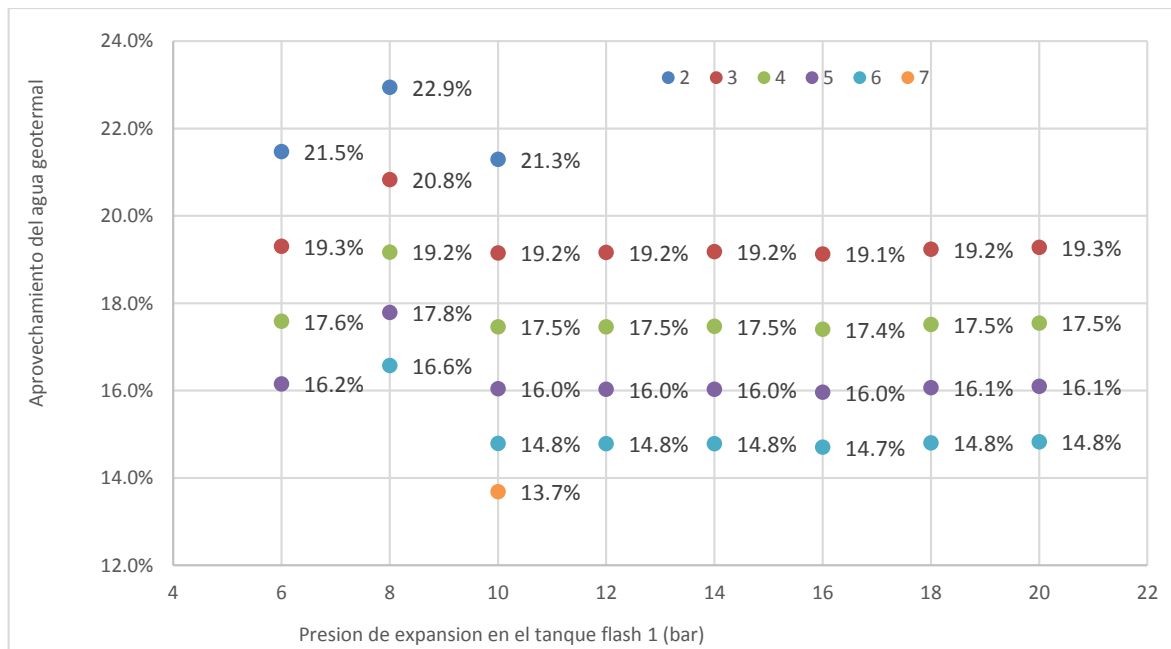
A la misma presión de expansión en el tanque flash 1 de 8 bar se presentan los 4 mayores valores de potencia efectiva que se puede generar para una central geotérmica de destello doble. Así tenemos los siguientes valores:

Presión 2 TF	Potencia efectiva total	Potencia TVMP	Potencia TVBP
4 Bar	4,754 MW	1,554 MW	3,2 MW
3 Bar	4,712 MW	2,032 MW	2,68 MW
5 Bar	4,62 MW	1,19 MW	3,43 MW
2 Bar	4,58 MW	1,98 MW	2,6 MW

Se presenta el porcentaje de aprovechamiento del agua geotermal.

Figura 35

Aprovechamiento del agua geotermal para una central geotérmica de destello de expansión doble con presión con presión de descarga de 1 bar en la turbina de vapor



Nota. Se tiene un mayor grado de aprovechamiento del agua geotermal es mayor para el caso de la presión de descarga del tanque flash 2 es de 2 bar y con el cual se alcanza una potencia efectiva de 4,58 MW

4.4 Evaluación económica

Para la determinación del costo nivelado de la central geotérmica se tiene en cuenta las siguientes premisas:

Para los costos de inversión de la central geotérmica se toma en cuenta los valores del Documento Expansión óptima de la generación y transmisión del SEIN al 2050 – Escenario Base del Ministerio de Energía y Minas (2024), así tenemos los siguientes valores:

Inversión central geotérmica 4 818 U\$/kW

Costo adicional en la inversión por doble expansión 1 000 U\$/kW adicionales.

Costo adicional por condensador de vacío (para el caso de las centrales geotérmicas con presión de descarga de la turbina de vapor de vacío con 0,1 y 0,5 bar) 400 U\$/kW adicionales por el sistema de vacío más robusto.

El valor de la inversión o CAPEX incluye la exploración geológica, perforación de pozos (lo más caro) y la Planta (turbina, intercambiadores, etc.)

Vida útil n : 30 años.

Costo de operación y mantenimiento: 115 U\$/kW año

Incluye el costo de Mantenimiento, Operación y la Reinyección de fluidos.

Inversión por conexión: 90 U\$/kW

Tasa de interés del mercado eléctrico i : 12%.

Con respecto a la operación se toma en cuenta un factor de planta de 90% para su operación anual y operación en base, tomando en cuenta que opera con turbinas de vapor y por ser una Central RER (Recursos energéticos renovables), según el DL N° 1002 referido a la promoción de la generación con recursos energéticos renovables tienen prioridad en el despacho de generación.

Se presenta el caso de la central geotérmica de destello de expansión doble de 4.754 MW con los siguientes valores de presión:

Presión de expansión en el tanque flash 1: 8 bar.

Presión de expansión en el tanque flash 2: 4 bar.

Presión de descarga de la turbina de vapor: 1 bar.

Para hallar la inversión total de la central geotérmica I_T se determina como la suma de la inversión de la instalación y la inversión de la conexión eléctrica.

Inversión de la instalación:

$$I_I = 5\,818 \frac{U\$}{kW} * 4,754 MW * 1\,000 \frac{kW}{MW} = 27'658\,772 U\$$$

Inversión de la conexión eléctrica:

$$I_C = 90 \frac{U\$}{kW} * 4,754 MW * 1\,000 \frac{kW}{MW} = 427\,860 U\$$$

La Inversión total de la central geotérmica:

$$I_T = 27'658\,772 + 427\,860 = 28'086\,632 U\$$$

La anualidad de la inversión es igual a:

$$A = I_T * \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Reemplazando valores tenemos el valor de la anualidad de la inversión.

$$A = 3'486\,777,22 U\$$$

Del mismo se determina el costo anual de operación y mantenimiento.

$$C_{OM} = 115 \frac{U\$}{kW} * 4,754 MW * 1\,000 \frac{kW}{MW} = 546\,710 U\$$$

Seguidamente se determina la sumatoria de los costos anuales:

$$Costos\ totales = \sum_{t=1}^n \frac{C_i}{(1 + i)^n}$$

$$C_i = A + C_{OM}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$\text{Costos totales} = \sum_{t=1}^n \frac{C_i}{(1+i)^n} = 32'490\,481,59 \text{ U\$}$$

Del mismo modo, la energía anual generada es:

$$E_i = \text{Potencia} * 24 \text{ horas} * 365 \text{ dias} * \text{Factor de Planta}$$

$$E_i = 4,754 \text{ MW} * 24 \text{ horas} * 365 \text{ dias} * 0,9 = 37\,480,54 \text{ MWh}$$

Seguidamente se determina la sumatoria de la energía anual:

$$\text{Energia total} = \sum_{t=1}^n \frac{E_i}{(1+i)^n}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$\text{Energia total} = \sum_{t=1}^n \frac{E_i}{(1+i)^n} = 301\,912,64 \text{ MWh}$$

Final el valor del costo nivelado es:

$$LCOE = \frac{32'490\,481,59 \text{ U\$}}{301\,912,64 \text{ MWh}} = 107,62 \frac{\text{U\$}}{\text{MWh}}$$

Se presentan los resultados de los costos nivelados para cada una de las soluciones hallados para las centrales geotérmicas de destello. Donde el menor valor para una central geotérmica de destello para el yacimiento de Covire, Tacna, es para una del tipo de destello simple con una presión de descarga de la turbina de vapor de 1 bar es igual a 91,87 U\$/MWh.

Tabla 5

LCOE para centrales geotérmicas de destello.

Tipo de Central	Presión de descarga (bar)	LCOE (U\$/MWh)
Destello de expansión simple	0,1-0,5	98,17
Destello de expansión simple	1	91,87
Destello de expansión doble	0,1-0,5	113,91
Destello de expansión doble	1	107,62

Nota. Se presenta la evaluación económica con la determinación del costo nivelado o LCOE para las centrales geotérmicas de destello para el yacimiento de Covire, Tacna, como parte de los resultados obtenidos en la presente tesis. Ver anexos 14,15,16 y 17.

De los resultados obtenidos del costo nivelado LCOE entre 91,87 a 113, 91 U\$/MWh, son valores superiores al rango mínimo de 50 U\$/MWh y también superiores en 2 casos al rango máximo de 100 U\$/MWh.

El análisis siguientes es teniendo que las tecnologías a comparar todas operan como centrales de energía de base: Los valores de LCOE obtenidos no es un indicador que la central geotérmica sea inviable económicamente, lo que si representa es que no sea competitiva contra otras tecnologías durante su vida útil, así tenemos que, según fuentes del ministerio de energía y minas, el valor del LCOE de una central hidroeléctrica varia entre 30 a 60 U\$/MWh según sea de pasada o de embalse o de superficie o de caverna (pero es mas competitiva que una central geotérmica); para una central termoelectrica de ciclo combinado con gas natural el LCOE varia entre 50 a 80 U\$/MWh y para centrales RER solares y eólicas se tienen un rango de 25 a 60 U\$/MWh (según los últimos valores de subastas RER 2018 y centrales RER ingresantes al SEIN hasta el año 2025), con lo cual los valores del LCOE de una central geotérmica de destello es mucho mas alto con lo cual no pueden competir en el despacho de energía con las tecnologías actualmente instaladas. Por lo tanto: un LCOE entre 91,87 a 113,91 U\$/MWh no compromete la viabilidad técnica de una central geotérmica, pero sí puede afectar su competitividad económica dentro del mercado eléctrico peruano, caracterizado por costos marginales relativamente bajos asociados al gas natural e hidroelectricidad.

Por otro lado cabe mencionar por seguridad (tal como se hace en todos los países con tecnología de este tipo) en este por centrales de energía de base, su inversión es subsidiado por el estado, con la finalidad de poder tener un a central de operación en

base que pueda alternar con las centrales termoeléctricas con gas natural (que entre estos días de marzo 2026 fueron afectados por el siniestro en el ducto de transporte) en el despacho de generación, como consecuencia de ello se tuvo que operar contrales termoeléctricas con diésel DB5(que si bien es cierto dieron seguridad al suministro en estos días) cuyo LCOE es mucho elevado en el Peru el cual varia desde 120 a 250 U\$/MWh dependiendo de la ubicación de la central de generación y la distancia a su punto de suministro o terminal de descarga del combustible.

4.5 Discusión de resultados

Según el estudio de Arcos, O. et al. (2017) referente al desarrollo del campo Chivay-Pinchollo en la región Arequipa para generación eléctrica y estima instalar una central geotérmica de 90 MW, con inversión privada, estimando una inversión de 436,9 millones de dólares, con una relación inversión potencia de 4,85 millones U\$/MW. Para nuestra investigación se toma en consideración el yacimiento de Covire, Tacna para una generación eléctrica con una central geotérmica de destello de expansión única de 6,297 MW con una inversión de 32'424 476 U\$ para una presión de descarga de 0,1 bar (con una relación inversión potencia de 5,15 millones U\$/MW) o una central geotérmica de destello de expansión doble de 4,580 MW con una inversión de 27'058 640 U\$ para una presión de descarga de 1 bar (con una relación inversión potencia de 5,90 millones U\$/MW)

Según lo investigado por Bonilla, A. et al. (2017) indica que se puede conseguir un mejor desempeño de una central geotérmica de destello incremento el número de expansiones o tanques flash, sin embargo, la inclusión de una tercera cámara o tanque flash no contribuye en el incremento de su desempeño, lo que limita los valores de potencia obtener son las restricciones en la calidad de las turbinas de vapor, el cual no debe ser menor a 88%. En nuestra investigación se ha determinado que para un recurso geotérmico de 90,44 kg/s una central geotérmica de destello de expansión única o simple permite una mayor potencia efectiva que una central geotérmica de destello de expansión doble. Para el caso de la expansión se consigue una mayor potencia efectiva igual a 7,048 MW con una presión de descarga de 0,1 bar y para una central geotérmica de destello de expansión doble un valor de 4,754 MW.

Según Bulnes, J. (2018) para una central geotérmica basada en el ciclo Rankine orgánico en el Yacimiento Geotérmico Jesús María – Moquegua, se consigue una máxima potencia

con un flujo de agua geotermal de 101,1 kg/s con una eficiente de planta de 11,7%. También Miranda, R. & Peralta, R. (2017) concluyen que el número de pozos geotermales influye en la capacidad de la potencia efectiva, así como la temperatura del yacimiento. Las centrales geotérmicas se evalúan en función del grado de aprovechamiento del agua geotermal así tenemos que para nuestra investigación tenemos para la central geotérmica de destello de expansión única es de 24,97, mientras que para una central geotérmica de destello de expansión doble es de 22,9%.

Según lo detallado por Guillen, E. & Medina, D. (2019) para diseñar una central geotérmica se requiere tener un conocimiento previo del valor del recurso geotermal y el valor de la temperatura del yacimiento, para su caso es entre 230 °C y 250 °C para la producción de electricidad con una potencia efectiva de 100 MW, así como también es relevante conocer los valores de presión de operación, aunque no indica los valores ni del flujo masico de agua geotermal. En nuestra investigación se ha tenido un valor de 90,44 kg/s de agua geotermal a una operación de 27 bar de presión y 230 °C ingresante al tanque flash, para el caso de una central geotérmica de destello de expansión simple a una presión de descarga de 0,1 bar se obtienen potencias efectivas de 7,048 y 6,297 MW para presión de expansión en el tanque flash de 2 y 1 bar respectivamente. Mientras que para una central geotérmica de destello de expansión doble y a una presión de descarga de 1 bar desde la turbina de vapor se consigue la potencia efectiva máxima de 4,754 MW a un valor de presión de 8 bar en el 1 tanque flash y 4 bar en el 2 tanque flash.

Pérez, V. & Velásquez, J. (2024) en su investigación para centrales geotérmicas binarias identifica la importancia del valor relevante de la presión para un buen aprovechamiento de los recursos geotermales cuando la temperatura es baja, en este caso 96°C y con presiones de 4,5 bar operando con Isopentano, 13 bar operando con isobutano y 10 bar para el refrigerante R245fa con fluidos de operación de 114,1 kg/s, 70., kg/s y 70 kg/s, respectivamente. Del mismo modo Pinedo, C. & Ramírez, E. (2015) en su investigación para la zona geotermal de Corongo las temperaturas de 60 °C hasta 290 °C, con un flujo másico mayor a 15 kg/s, operando con presiones de 10 bar y de descarga de 0.65 bar. Para nuestra investigación se han determinado un total de 59 soluciones para una central geotérmica de destello de expansión simple o única y 216 soluciones para una central geotérmica de destello de expansión doble, conjugando los valores de presión de expansión para tres casos de descarga en la turbina de vapor de 0,1, 0,5 y 1 bar. simple o única.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

- Se caracterizó el recurso geotermal disponible para el yacimiento de Covire, Tacna, que incluye también el yacimiento de Ancocollo con flujo de agua geotermal de 90,44 kg/s con una temperatura media de 231,9 °C correspondiente a una presión de operación de 27 bar, así mismo las presiones de descarga de la turbina de vapor serán de 1, 0,5 y 0,1 bar.
- Con respecto a las presiones intermedias o de ingreso al tanque flash de la central geotérmica de destello de expansión simple se tomaron valores desde 20 a 1 bar, para un total de 59 soluciones; mientras que para centrales de destello de expansión doble se tomaron valores de 20, 18,16,14, 12, 10, 8 y 6 bar para el 1 tanque de expansión y valores de 16,15, 14, 13, 12, 11, 10, 9,8,7,6,4,3,2 para el 2 tanque expansión con un total de 216 soluciones.
- Se evaluó el potencial de generación de energía en función a la presión de expansión en una central geotérmica de destello de expansión simple, en este caso se encontraron solo 19 soluciones técnicas viables, donde la mayor potencia conseguida es de 7,048 MW para una presión de expansión en el tanque flash 1 es de 2 bar de presión, con un grado de aprovechamiento de 21,64% del agua geotermal.
- Se evaluó el potencial de generación de energía en función a la presión de expansión en una central geotérmica de destello de expansión doble, en este caso se encontraron solo 43 soluciones técnicas viables para presiones de descarga de 0,5 y 1 bar de presión; donde la mayor potencia conseguida es de 6,27 MW para una presión de expansión en el tanque flash 1 es de 8 bar de presión y una presión de expansión en el tanque flash 2 de 2 bar. Para el caso anterior se tiene un agrado de aprovechamiento del agua geotermal de 22,9%
- Se realizó una evaluación económica para determinar el costo nivelado para centrales geotérmicas de destello, en donde la de mayor potencia es la central de expansión simple con una presión de descarga a 0,1 y 0,5 bar de la turbina de vapor la cual tiene un LCOE de 98,17 U\$/MWh. Siendo la central de mayor LCOE con un valor de 113,91 U\$/MWh para una central geotérmica de destello de expansión doble con presiones de descarga de la turbina de vapor de 0,1 y 0,5 bar. Según el valor de los LCOE obtenidos, estas centrales no son competitivas económicamente con respecto a

las centrales de energía que operan en el SEIN. Pero por seguridad energética y diversificación de la matriz energética son necesarias tenerlas.

- Con referencia a la hipótesis planteada esta se ha refutado, porque que se ha conseguido la mayor potencia efectiva para una central geotérmica de destello para el yacimiento de Covire, Tacna, para un valor de presión de expansión simple a una presión de 2 bar.

5.2 Recomendaciones.

- Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad que evalúe la influencia de la presión de expansión sobre la generación de potencia, considerando variaciones en parámetros clave como la temperatura del yacimiento, el caudal másico y la presión de condensación. Este análisis permitirá identificar tendencias y comprender mejor la relación entre las variables del sistema.
- También es recomendable considerar pérdidas reales del sistema, tales como caídas de presión en tuberías, pérdidas térmicas y eficiencias de los equipos, con el fin de aproximar el modelo a condiciones operativas reales. Del mismo modo, se debe analizar la influencia de la presión de condensación, dado que esta afecta directamente el proceso de expansión y, por ende, la potencia generada.
- Asimismo, se sugiere evaluar configuraciones alternativas de la central geotérmica, como sistemas de triple expansión, con el fin de comparar el desempeño energético frente a la configuración de expansión simple. Esta comparación permitirá determinar si la implementación de una etapa adicional de expansión resulta técnica y económicamente viable para el yacimiento de estudio.
- De igual manera, es importante incluir un análisis de degradación del sistema a lo largo del tiempo, considerando factores como la disminución de presión del reservorio, la posible incrustación en tuberías y equipos, y la reducción de eficiencia de la turbina. Esto permitirá evaluar el comportamiento de la central en el largo plazo y su impacto en la generación de potencia.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Tesis.

Acosta, L. (2020). Propuesta para el desarrollo de un proyecto geotérmico en cascada en el municipio de Villamaría, Caldas. Tesis para optar el Grado de Maestro en Gestión ambiental en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Colombia. Disponible en:

<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/48146>

Ambriz, V. (2020). Análisis energético y exergo económico avanzado de una planta de poligeneración con uso en cascada de la energía geotérmica de media y baja entalpia. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. México. Disponible en:

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=373255>

Arcos, O., Francisco, E., Soto, O. y Torres, L. (2017). Evaluación de la Viabilidad del desarrollo Geotérmico del campo Chivay-Pinchollo en la región Arequipa para generación eléctrica con el fin de diversificar la matriz energética del Perú. Tesis de maestría de gestión de la energía. Universidad ESAN- Disponible en:

<https://repositorio.esan.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d284380d-448b-4bbe-993d-cf82c05ffd3e/content>

Bermeo, O. (2023). Los “factores políticos y de mercado” frenan el desarrollo de la energía geotérmica en Perú. Blog de climatetracker. Perú. Disponible en:

<https://climatetrackerlatam.org/historias/energia-geotermica-en-peru/>

Bonilla, A., Lugo, H., Lugo, R., Mora, A. y Salazar, M. (2017) Análisis paramétrico de las centrales geo termoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos. Artículo DYNA, vol. 84, núm. 203, pp. 273-282, 2017. Universidad Nacional de Colombia. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/journal/496/49655603035/html/>

Boles, M. & Cengel, Y. (2015). Termodinámica. Editorial Mc Graw Hill. 8° Edicion.

Bulnes, J. (2018). Dimensionamiento y selección de una central geotérmica basada en el ciclo Rankine orgánico ubicada en el Yacimiento Geotérmico Jesús María – Moquegua. Tesis de ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Disponible:

<https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/2978>

- Cárcamo, E. y Rivera, A. (2016). Diseño conceptual de un sistema híbrido integrado de simple flash - binario para una planta geotérmica. Tesis de Postgrado. Universidad de El Salvador. Disponible en:
<https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/0eb02736-29c7-4c5e-801a-bb9d1d203e27/content>
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A. y Castro, M. (2009). Centrales de energías renovables. Editorial Pearsons Education. México. Disponible en:
https://www.academia.edu/40486842/Centrales_de_energ%C3%ADas_renovables_Generaci%C3%B3n_el%C3%A9ctrica_con_energ%C3%ADas_renovables_Carta_Calero_Colmenar_Castro_Centrales_de_energ%C3%ADas_renovables
- Cengel, Y. y Bonus, M. (2011) Termodinámica. Editorial Mc Graw Hill. 7ª Edición. Disponible en:
https://www.academia.edu/39821820/Termodin%C3%A1mica_Cengel_and_Bonus_7ma_edici%C3%B3n
- Cruz, V., Flores, R., Otero, J., Velarde, J. y Casas, J. (2024). INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica N° 89 Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de las zonas geotermales de Kovire, Ancocollo y Vilacota región Tacna, INGEMMET. Disponible en:
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/5056>
- Curí, J. (2021). Evaluación de la generación eléctrica con recurso geotérmico en la región sur peruana. Tesis de ingeniería en energía. Universidad UTEC. Perú. Disponible en:
https://repositorio.utec.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12815/232/Curi%20Yauri_TI.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Del Cristo, M. (2015) Análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en terrenos volcánicos. Aplicaciones a la construcción en Tenerife. Tesis de Doctorado en Edificación, tecnología, Construcción y Desarrollo. Universidad Politécnica de Alicante. Valencia. Disponible en:
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/53668/1/tesis_exposito_martin.pdf
- De Montreuli, C. (2018). Análisis térmico y selección de ciclo de proceso para la implementación de una planta piloto de 10 MW de energía geotermal en el campo geotérmico de Calientes – Tacna. Tesis para optar el título de Ingeniero

Mecánico de Fluidos en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.
Disponible en:

<https://files.core.ac.uk/download/pdf/323351399.pdf>

Dirección general de eficiencia energética (2024) EXPANSIÓN ÓPTIMA DE LA GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DEL SEIN AL 2050 ESCENARIO BASE. Documento de trabajo. Ministerio de energía y minas del Peru.

https://eficienciaenergetica.minem.gob.pe/Content/fileman/Uploads/Documents/PLANEAMIENTO/InformeFinal_Expansi%C3%B3n_Optima_GyT_Escenario%20BASE_vf2.pdf?utm_source=chatgpt.com

García, S. (2022) Análisis de la viabilidad de instalación de una central geotérmica para el aprovechamiento eléctrico de los recursos geotérmicos en la isla de La Palma. Tesis de ingeniería de la energía. Universidad Politécnica de Valencia. España

<https://riunet.upv.es/entities/publication/b8f7a3ba-e598-40d9-9a92-d4f2144dae10>

Gamarra, C. (2021). Dimensionamiento de una central geotérmica en Moquegua de 8 MW. Tesis de ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Santo Toribio de Mogrovejo. Disponible en:

file:///C:/Users/HP%20250/Downloads/TL_GamarraChuyoCarlosGuillermo.pdf

Jostyn, A. & Jonker, A. (2024). ¿Qué es el costo nivelado de energía (LCOE)?. Pagina IBM. México. Disponible en:

<https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/levelized-cost-of-energy>

Guevara, R. (2022). Guevara, R. (2022). Manual II del curso de auditorías energética. Universidad Nacional del Santa. Disponible em:

<https://es.scribd.com/document/444924463/manual-AUDITORIAS-ENERGETICAS>

Guillen, E. y Medina, D. (2019). Diseño de Una Central Geotérmica de 100 MW desde la Generación de Energía Eléctrica Hasta su Transmisión a la Subestación Eléctrica Montalvo de la Ciudad de Moquegua y Aprovechamiento Cogenerativo para Desarrollo Sostenible. Tesis de ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Católica de Santa María. Disponible en:

<https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/da989c9e-70f7-4b5e-8c82-0032a0cc0556>

- Lacourt, O. (2010). Análisis de diversas alternativas de generación eléctrica con fuentes geotermales en Chile. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile.
https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-lacourt_om/html/index.html
- Mendoza, J. (2014). CENTRAL DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA. EVALUACIÓN SISTEMA DE CONDENSACIÓN Y EXTRACCIÓN DE INCONDENSABLES. Tesis de fin de grado. Universidad Carlos III. España.
<https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/3c8e280d-f022-4e36-a863-78300ffc0ef4>
- Miranda, R. & Peralta, R. (2017). Análisis de estudio de la energía geotérmica de las aguas termales de Putina empleando isobutano para la generación de energía eléctrica para la localidad de Putina. Tesis de ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Nacional del Altiplano. Disponible en:
https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/5722/Peralta_Quilla_Ronald_Miranda_Rodriguez_Rolando_Efrain.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pérez, V. & Velásquez, J. (2024). Evaluación del fluido de operación en el performance del ciclo binario mediante energía geotérmica en la Región 2 – Ancash, 2022. Tesis de ingeniería en Energía. Universidad Nacional del Santa. Disponible en:
<https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/4924>
- Piedra, A. & Jaramillo, M. (2011). PROYECTO DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN GEOTÉRMICA EN EL ECUADOR. Universidad Politécnica del Ecuador. Tesis de ingeniería Eléctrica. Disponible en:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4367/1/CD-3967.pdf>
- Pinedo, C. & Ramírez, E. (2015). Análisis y evaluación del potencial geotérmico para su aprovechamiento mediante una central de ciclo binario para generación de potencia eléctrica en la región Corongo-Ancash, Perú. Tesis de ingeniería en Energía. Universidad Nacional del Santa. Disponible en:
<https://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14278/2633/30745.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Robles, G. (2023). Propuesta de un sistema de vapor flash para la disminución en el consumo de vapor vivo en zona de cocinas COPEINCA Chimbote. Tesis de ingeniería en Energía. Universidad Nacional del Santa. Disponible en:

<https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/4406>

Salazar, M., Mora, A., Bonilla, A., Lugo, R. y Lugo, M. (2017). Análisis paramétrico de las centrales geo termoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos. Artículo científico DYNA 0012-7353 Universidad Nacional de Colombia.

Disponible en:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/66126/88210>

Sandoval, L. (2022). Potencia de grupos electrógenos para la cobertura de demanda de energía en S.E Sechura. Tesis de ingeniería en Energía. Universidad Nacional del Santa. Disponible en:

<https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3772>

VII. ANEXOS

Anexo 1: Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Kovire

Anexo 2: Mapa compuesto para el cálculo del potencial geotérmico de la zona geotermal Kovire.

Anexo 3: Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Ancocollo

Anexo 4: Mapa compuesto para el cálculo del potencial geotérmico de la zona geotermal Ancocollo.

Anexo 5: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión simple.

Anexo 6: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 20 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 7: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 18 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 8: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 16 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 9: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 14 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 10: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 12 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 11: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 10 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 12: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 8 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 13: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 6 bar en el tanque de expansión 1.

Anexo 14: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión simple con presión de descarga de la turbina de vapor de 1 bar.

Anexo 15: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión simple con presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1 y 0,5 bar.

Anexo 16: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de la turbina de vapor de 1 bar.

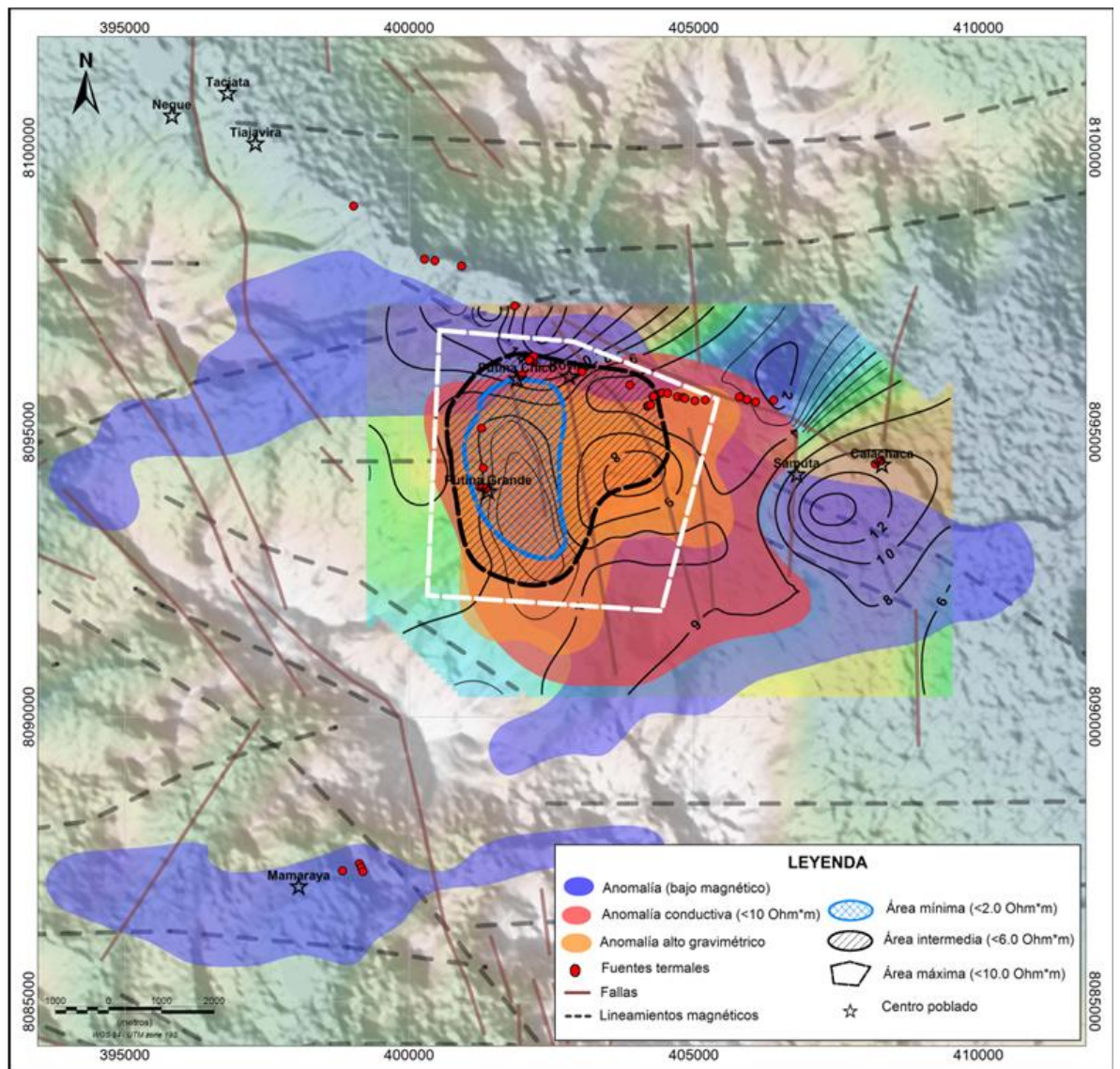
Anexo 17: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 y 0,1 bar.

Anexo 1: Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Kovire

Parámetros		Min		Max	Unidades
Área	A	5	12	20	km ²
Espesor de reservorio	h	700	1000	1300	m
Calor específico de la roca	Cr	0.8	0.9	1	kJ/kg deg(C)
Calor específico del fluido	Cf	4.4	4.6	4.8	kJ/kg deg(C)
Porosidad de la roca	phi	0.05	0.1	0.15	
Temperatura media del reservorio	Ti	180	220	258	deg(C)
Temperatura de abandono del reservorio	Tf		140		deg(C)
Densidad de la roca	rho _r	2200	2400	2600	kg/m ³
Densidad del fluido	rho _f		887.3		kg/m ³
Factor de recuperación del calor	Rf	0.1	0.15	0.15	adim
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	0.1	0.15	adim
Factor de planta	Pr	0.85	0.9	0.95	adim
Tiempo	t	25	30	30	years

Nota. Obtenido de Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de las zonas geotermales de Kovire, Ancocollo y Vilacota, región Tacna INGEMMET, 2024.

Anexo 2: Mapa compuesto para el cálculo del potencial geotérmico de la zona geotermal Kovire.



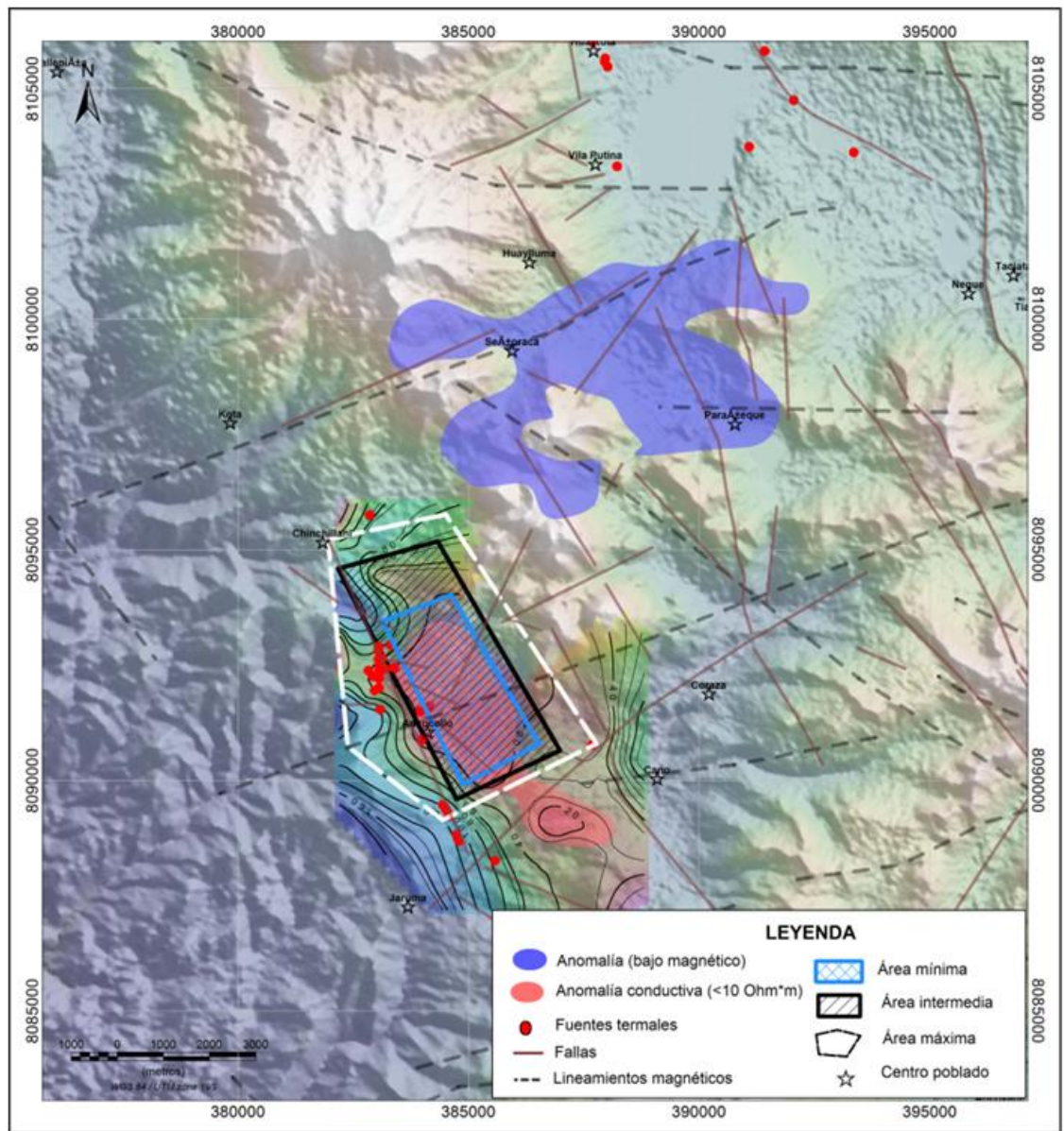
Nota. Obtenido de Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de las zonas geotermales de Kovire, Ancocollo y Vilacota, región Tacna INGEMMET, 2024.

Anexo 3: Valores utilizados para la estimación del potencial geotérmico de Ancocollo.

Parámetros		Min		Max	Unidades
Área	A	7	13	24	km ²
Espesor de reservorio	h	800	1000	1600	m
Calor específico de la roca	Cr	0.8	0.9	1	kJ/kg deg(C)
Calor específico del fluido	Cf	4.4	4.6	4.8	kJ/kg deg(C)
Porosidad de la roca	phi	0.05	0.1	0.15	
Temperatura media del reservorio	Ti	180	240	270	deg(C)
Temperatura de abandono del reservorio	Tf		140		deg(C)
Densidad de la roca	rhor	2400	2500	2600	kg/m ³
Densidad del fluido	rhof		887.3		kg/m ³
Factor de recuperación del calor	Rf	0.09	0.1	0.15	adim
Eficiencia de conversión	Ce	0.1	0.1	0.15	adim
Factor de planta	Pf	0.85	0.9	0.95	adim
Tiempo	t	25	30	30	years

Nota. Obtenido de Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de las zonas geotermales de Kovire, Ancocollo y Vilacota, región Tacna INGEMMET, 2024.

Anexo 4: Mapa compuesto para el cálculo del potencial geotérmico de la zona geotermal Ancocollo.



Nota. Obtenido de Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de las zonas geotermales de Kovire, Ancocollo y Vilacota, región Tacna INGEMMET, 2024.

Anexo 5: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión simple.

Presion de descarga de la turbina de vapor de 0,1 bar																	
P1	P2	m1	m2	m3	h1	h2	h3	m3	h3	s3	s4i	h4i	X	h4r	P TV	Xr	Pg
27	20	90.44	86.96	3.48	981.2	908.6	2797.2	3.48	2797.2	6.3366	6.3366	2010.5	0.76	2089.17	2463.94	0.795	2.218
27	18	90.44	85.87	4.57	981.2	884.6	2794.8	4.57	2794.8	6.375	6.375	2022.4	0.764	2099.64	3176.88	0.797	2.859
27	16	90.44	84.7	5.74	981.2	858.6	2791.7	5.74	2791.7	6.4175	6.4175	2029.6	0.768	2105.81	3937.01	0.801	3.543
27	14	90.44	83.46	6.98	981.2	830.1	2787.6	6.98	2787.6	6.4651	6.4651	2046.4	0.775	2120.52	4656.22	0.806	4.191
27	12	90.44	82.11	8.33	981.2	798.4	2782.7	8.33	2782.7	6.5194	6.5194	2063.1	0.782	2135.06	5394.84	0.813	4.855
27	10	90.44	80.62	9.82	981.2	762.6	2776.2	9.82	2776.2	6.5828	6.5828	2082.3	0.79	2151.69	6132.69	0.819	5.519
27	8	90.44	78.94	11.5	981.2	720.9	2767.5	11.5	2767.5	6.6596	6.6596	2106.2	0.8	2172.33	6844.46	0.828	6.16
27	6	90.44	76.96	13.48	981.2	670.4	2755.5	13.48	2755.5	6.7576	6.7576	2139.7	0.814	2201.28	7470.89	0.84	6.724
27	4	90.44	74.48	15.96	981.2	604.7	2737.6	15.96	2737.6	6.8994	6.8994	2182.8	0.823	2238.28	7969.15	0.856	7.172
27	2	90.44	70.87	19.57	981.2	504.7	2706.3	19.57	2706.3	7.1268	7.1268	2261.7	0.865	2306.16	7830.74	0.884	7.048
27	1	90.44	67.86	22.58	981.2	417.5	2675.4	22.58	2675.4	7.3598	7.3598	2331.1	0.894	2365.53	6996.86	0.908	6.297
Presion de descarga de la turbina de vapor de 1 bar																	
P1	P2	m1	m2	m3	h1	h2	h3	m3	h3	s3	s4i	h4i	X	h4r	P TV	Xr	Pg
27	20	90.44	86.96	3.48	981.2	908.6	2797.2	3.48	2797.2	6.3366	6.3366	2291.6	0.83	2342.16	1583.54	0.852	1.425
27	18	90.44	85.87	4.57	981.2	884.6	2794.8	4.57	2794.8	6.375	6.375	2309.8	0.838	2358.3	1994.81	0.86	1.795
27	16	90.44	84.7	5.74	981.2	858.6	2791.7	5.74	2791.7	6.4175	6.4175	2320.9	0.843	2367.98	2432.15	0.864	2.189
27	14	90.44	83.46	6.98	981.2	830.1	2787.6	6.98	2787.6	6.4651	6.4651	2343.5	0.853	2387.91	2789.84	0.873	2.511
27	12	90.44	82.11	8.33	981.2	798.4	2782.7	8.33	2782.7	6.5194	6.5194	2361.6	0.861	2403.71	3156.99	0.881	2.841
27	10	90.44	80.62	9.82	981.2	762.6	2776.2	9.82	2776.2	6.5828	6.5828	2384.1	0.871	2423.31	3465.38	0.888	3.119
27	8	90.44	78.94	11.5	981.2	720.9	2767.5	11.5	2767.5	6.6596	6.6596	2411.2	0.883	2446.83	3687.71	0.898	3.319
27	6	90.44	76.96	13.48	981.2	670.4	2755.5	13.48	2755.5	6.7576	6.7576	2445.1	0.9	2476.14	3765.77	0.912	3.389
27	4	90.44	74.48	15.96	981.2	604.7	2737.6	15.96	2737.6	6.8994	6.8994	2501.1	0.923	2524.75	3397.09	0.923	3.057
27	2	90.44	70.87	19.57	981.2	504.7	2706.3	19.57	2706.3	7.1268	7.1268	2589.6	0.962	2601.27	2055.44	0.967	1.85
27	1	90.44	67.86	22.58	981.2	417.5	2675.4	22.58	2675.4	7.3598	7.3598	2675.4	1	2675.4	0	1	0
Presion de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar																	
P1	P2	m1	m2	m3	h1	h2	h3	m3	h3	s3	s4i	h4i	X	h4r	P TV	Xr	Pg
27	20	90.44	86.96	3.48	981.2	908.6	2797.2	3.48	2797.2	6.3366	6.3366	2201.1	0.807	2260.71	1866.99	0.833	1.680
27	18	90.44	85.87	4.57	981.2	884.6	2794.8	4.57	2794.8	6.375	6.375	2214.9	0.813	2272.89	2385.13	0.838	2.147
27	16	90.44	84.7	5.74	981.2	858.6	2791.7	5.74	2791.7	6.4175	6.4175	2228.7	0.819	2285	2908.46	0.843	2.618
27	14	90.44	83.46	6.98	981.2	830.1	2787.6	6.98	2787.6	6.4651	6.4651	2244.9	0.826	2299.17	3409.24	0.85	3.068
27	12	90.44	82.11	8.33	981.2	798.4	2782.7	8.33	2782.7	6.5194	6.5194	2265.6	0.835	2317.31	3876.7	0.858	3.489
27	10	90.44	80.62	9.82	981.2	762.6	2776.2	9.82	2776.2	6.5828	6.5828	2288.7	0.845	2337.45	4308.53	0.866	3.878
27	8	90.44	78.94	11.5	981.2	720.9	2767.5	11.5	2767.5	6.6596	6.6596	2311.7	0.855	2357.28	4717.53	0.875	4.246
27	6	90.44	76.96	13.48	981.2	670.4	2755.5	13.48	2755.5	6.7576	6.7576	2348.8	0.871	2389.47	4934.08	0.888	4.441
27	4	90.44	74.48	15.96	981.2	604.7	2737.6	15.96	2737.6	6.8994	6.8994	2397	0.892	2431.06	4892.38	0.907	4.403
27	2	90.44	70.87	19.57	981.2	504.7	2706.3	19.57	2706.3	7.1268	7.1268	2477.7	0.927	2500.56	4026.33	0.937	3.624
27	1	90.44	67.86	22.58	981.2	417.5	2675.4	22.58	2675.4	7.3598	7.3598	2558.4	0.962	2570.1	2377.67	0.967	2.140

Nota. Elaboración propia.

Anexo 6: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 20 bar en el tanque de expansión 1.

Presión de escape de la turbina de vapor de 0,1 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P5	Q	s6	h6	W6	h6 Real	PV1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	s7	m7	m8	P8	s7-s8	x8	h8	h8	PV2	PE2	h6 Tot (MM)
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	16	6.3866	6.3866	2751.10	0.979	2755.71	144.39	0.13	2797.7	2.25	938.6	84.71	2769.84	0.989	5.73	5.73	0.1	6.972	0.763	2017.7	2092.91	3978.81	3.49	3.62
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	15	6.3866	6.3866	2743.38	0.973	2748.76	168.57	0.152	2798.9	2.86	844.7	84.1	2767.32	0.988	6.34	6.34	0.1	6.395	0.766	2024.8	2099.05	4293.83	3.81	3.92
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	14	6.3866	6.3866	2734.11	0.969	2740.42	197.59	0.178	2798.8	3.49	830.1	83.47	2764.14	0.988	6.97	6.97	0.1	6.405	0.769	2032	2105.21	4592.74	4.13	4.308
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	13	6.3866	6.3866	2720.50	0.962	2719.17	271.54	0.244	2798.4	4.14	814.7	82.82	2755.15	0.985	7.62	7.62	0.1	6.407	0.77	2034.4	2106.88	4943.87	4.45	4.684
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	12	6.3866	6.3866	2697.40	0.957	2707.38	312.57	0.281	2797.2	4.83	798.4	82.13	2751.16	0.984	8.31	8.31	0.1	6.45	0.772	2039.2	2110.4	5247.72	4.79	5.071
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	11	6.3866	6.3866	2681.81	0.951	2693.35	361.4	0.325	2797.7	5.55	781.1	81.41	2746.42	0.984	9.03	9.03	0.1	6.45	0.776	2048.8	2118.56	5669.58	5.1	5.425
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	10	6.3866	6.3866	2663.41	0.944	2676.79	419.03	0.377	2797.2	6.31	762.6	80.65	2740.86	0.982	9.79	9.79	0.1	6.502	0.781	2060.7	2128.72	5993.85	5.39	5.767
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	9	6.3866	6.3866	2642.20	0.937	2659.5	479.2	0.431	2797.1	7.11	742.6	79.85	2735.1	0.981	10.59	10.59	0.1	6.533	0.785	2070.3	2136.69	6382.21	5.7	6.181
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	8	6.3866	6.3866	2622.20	0.929	2639.7	548.1	0.483	2797.5	7.98	720.9	78.98	2728.69	0.981	11.46	11.46	0.1	6.572	0.793	2082.3	2146.94	6666.86	6	6.483
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	7	6.3866	6.3866	2598.11	0.921	2618.02	623.55	0.541	2792.2	8.93	697.1	78.05	2721.56	0.98	12.39	12.39	0.1	6.611	0.799	2090.2	2154.34	6965.64	6.3	6.861
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	6	6.3866	6.3866	2570.00	0.912	2594.52	705.33	0.605	2795.5	9.93	670.4	77.03	2713.72	0.98	13.41	13.41	0.1	6.661	0.8	2106.2	2166.95	7331.19	6.6	7.285
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	5	6.3866	6.3866	2536.81	0.900	2562.85	815.54	0.734	2797.6	11.08	640.1	75.88	2703.37	0.979	14.56	14.56	0.1	6.715	0.808	2125.3	2183.11	7574.99	6.82	7.564
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	4	6.3866	6.3866	2493.01	0.890	2532.48	921.4	0.829	2797.6	12.39	600.7	74.57	2692.61	0.979	15.87	15.87	0.1	6.786	0.818	2149.3	2203.63	7760.11	6.98	7.889
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	3	6.3866	6.3866	2465.50	0.876	2480.57	1067.07	0.940	2797.7	13.96	561.4	73	2677.98	0.978	17.44	17.44	0.1	6.873	0.828	2170.8	2230.66	7960.66	7.16	8.12
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	16	6.3866	6.3866	2751.1	0.979	2755.71	144.39	0.13	2797.7	2.25	938.6	84.71	2769.84	0.989	5.73	5.73	0.5	6.972	0.813	2214.9	2270.39	2861.85	2.58	2.71
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	15	6.3866	6.3866	2743.38	0.973	2748.76	168.57	0.152	2798.9	2.86	844.7	84.1	2767.32	0.988	6.34	6.34	0.5	6.395	0.816	2218	2276.35	3117.75	2.8	2.982
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	14	6.3866	6.3866	2734.11	0.969	2740.42	197.59	0.178	2798.8	3.49	830.1	83.47	2764.14	0.988	6.97	6.97	0.5	6.405	0.819	2228.7	2282.24	3358.84	3.02	3.188
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	13	6.3866	6.3866	2720.50	0.962	2719.17	271.54	0.244	2798.4	4.14	814.7	82.82	2755.15	0.985	7.62	7.62	0.5	6.407	0.821	2239.2	2288.5	3596.35	3.23	3.474
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	12	6.3866	6.3866	2697.40	0.957	2707.38	312.57	0.281	2797.2	4.83	798.4	82.13	2751.16	0.984	8.31	8.31	0.5	6.45	0.824	2249.2	2293.2	3821.44	3.44	3.721
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	11	6.3866	6.3866	2681.81	0.951	2693.35	361.4	0.325	2797.7	5.55	781.1	81.41	2746.42	0.984	9.03	9.03	0.5	6.45	0.828	2249.5	2293.9	4084.49	3.63	3.955
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	10	6.3866	6.3866	2663.41	0.944	2676.79	419.03	0.377	2797.2	6.31	762.6	80.65	2740.86	0.982	9.79	9.79	0.5	6.502	0.832	2258.7	2306.92	4248.27	3.82	4.197
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	9	6.3866	6.3866	2642.20	0.937	2659.5	479.2	0.431	2797.1	7.11	742.6	79.85	2735.1	0.981	10.59	10.59	0.5	6.533	0.837	2270.2	2316.69	4490.96	3.99	4.401
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	8	6.3866	6.3866	2622.20	0.929	2639.7	548.1	0.483	2797.5	7.98	720.9	78.98	2728.69	0.981	11.46	11.46	0.5	6.572	0.843	2284.1	2328.56	4685.49	4.13	4.632
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	7	6.3866	6.3866	2598.11	0.921	2618.02	623.55	0.541	2792.2	8.93	697.1	78.05	2721.56	0.98	12.39	12.39	0.5	6.611	0.85	2290.2	2342.34	4895.54	4.23	4.91
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	6	6.3866	6.3866	2570.00	0.912	2594.52	705.33	0.605	2795.5	9.93	670.4	77.03	2713.72	0.98	13.41	13.41	0.5	6.661	0.858	2308.6	2358.11	4763.73	4.29	4.95
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	5	6.3866	6.3866	2536.81	0.900	2562.85	815.54	0.734	2797.6	11.08	640.1	75.88	2703.37	0.979	14.56	14.56	0.5	6.715	0.865	2334.8	2374.66	4829.7	4.35	5.084
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	4	6.3866	6.3866	2493.01	0.890	2532.48	921.4	0.829	2797.6	12.39	600.7	74.57	2692.61	0.979	15.87	15.87	0.5	6.786	0.875	2357.1	2390.65	4931.11	4.41	5.198
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	3	6.3866	6.3866	2465.50	0.876	2480.57	1067.07	0.940	2797.7	13.96	561.4	73	2677.98	0.978	17.44	17.44	0.5	6.873	0.889	2391.1	2418.89	4933.31	4.07	5.09
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	16	6.3866	6.3866	2751.1	0.979	2755.71	144.39	0.13	2797.7	2.25	938.6	84.71	2769.84	0.989	5.73	5.73	1	6.972	0.838	2398.6	2355.62	2373.48	2.14	2.27
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	15	6.3866	6.3866	2743.38	0.973	2748.76	168.57	0.152	2798.9	2.86	844.7	84.1	2767.32	0.988	6.34	6.34	1	6.395	0.841	2361.4	2361.49	2379.96	2.32	2.492
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	14	6.3866	6.3866	2734.11	0.969	2740.42	197.59	0.178	2798.8	3.49	830.1	83.47	2764.14	0.988	6.97	6.97	1	6.405	0.844	2323.2	2367.29	2766.04	2.49	2.688
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	13	6.3866	6.3866	2720.50	0.962	2719.17	271.54	0.244	2798.4	4.14	814.7	82.82	2755.15	0.985	7.62	7.62	1	6.407	0.847	2321.1	2371.71	2921.81	2.63	2.874
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	12	6.3866	6.3866	2697.40	0.957	2707.38	312.57	0.281	2797.2	4.83	798.4	82.13	2751.16	0.984	8.31	8.31	1	6.45	0.85	2336.7	2378.15	3099.71	2.79	3.071
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	11	6.3866	6.3866	2681.81	0.951	2693.35	361.4	0.325	2797.7	5.55	781.1	81.41	2746.42	0.984	9.03	9.03	1	6.45	0.854	2345.7	2385.77	3265.67	2.93	3.25
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	10	6.3866	6.3866	2663.41	0.944	2676.79	419.03	0.377	2797.2	6.31	762.6	80.65	2740.86	0.982	9.79	9.79	1	6.502	0.859	2357	2395.39	3381.5	3.04	3.407
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	9	6.3866	6.3866	2642.20	0.937	2659.5	479.2	0.431	2797.1	7.11	742.6	79.85	2735.1	0.981	10.59	10.59	1	6.533	0.863	2366.1	2403	3535.94	3.17	3.601
27	90.44	981.2	20	908.6	3.48	2797.2	86.96	8	6.3866	6.3866	2622.20	0.929	2639.7	548.1	0.483	2797.5	7.98	720.9	78.98	2728.69	0.981	11.46	11.46	1	6.572	0.87	2381.9	2416.58	3755.78	3.22	3.713
27	90.44	98																													

Anexo 8: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 16 bar en el tanque de expansión 1.

Presión de escape de la turbina de vapor de 0,1 bar																															
PI	m1	h1	P1	h3	m2	h2	m3	P3	Q	s6	h6i	v6i	h6 Real	PV1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	x7	m7	m8	P8	s7-s8	x8	h8	h8r	PV2	PE2	h6f Tot (MW)
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	15	6.4175	6.4175	2780.20	0.986	2781.35	59.01	0.053	2789.9	0.53	844.7	81.18	2782.06	0.986	6.26	6.26	0.1	6.424	0.77	2044	2109.17	0112.28	3.23	3.93
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	14	6.4175	6.4175	2784.30	0.986	2785.04	41.55	0.117	2787.8	1.15	830.1	83.55	2780.51	0.991	6.89	6.89	0.1	6.4275	0.771	2055.8	2110.17	0487.74	4.09	4.217
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	13	6.4175	6.4175	2788.40	0.982	2789.08	21.94	0.194	2785.4	1.8	814.7	82.9	2781.56	0.988	7.54	7.54	0.1	6.4401	0.773	2041.6	2111.6	0885.62	4.4	4.94
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	12	6.4175	6.4175	2793.10	0.976	2790.76	7.94	0.263	2782.7	2.48	798.4	82.2	2783.41	0.983	8.22	8.22	0.1	6.465	0.774	2004	2114.94	1246.22	4.72	4.883
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	11	6.4175	6.4175	2797.95	0.971	2792.5	3.2	0.335	2779.7	3.2	781.1	81.5	2785.8	0.983	8.94	8.94	0.1	6.475	0.777	2049.2	2118.86	1804.84	5.04	5.375
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	10	6.4175	6.4175	2803.00	0.962	2800.59	5.81	0.429	2776.2	3.95	762.6	80.75	2780.47	0.978	9.69	9.69	0.1	6.485	0.778	2053.6	2121.29	2502.95	5.31	5.789
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	9	6.4175	6.4175	2808.30	0.954	2806.00	8.67	0.549	2772.1	4.76	742.6	79.94	2777.22	0.978	10.5	10.5	0.1	6.492	0.782	2063.1	2123.91	3275.96	5.65	6.175
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	8	6.4175	6.4175	2813.80	0.944	2811.68	11.64	0.645	2767.5	5.62	720.9	79.08	2771.61	0.975	11.36	11.36	0.1	6.544	0.786	2072.7	2127.09	4083.35	5.99	6.575
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	7	6.4175	6.4175	2819.80	0.934	2819.8	14.63	0.753	2762.5	6.54	697.1	78.16	2767.77	0.974	12.28	12.28	0.1	6.622	0.791	2084.7	2131.01	4988.13	6.2	6.953
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	6	6.4175	6.4175	2826.20	0.926	2826.25	17.65	0.886	2757.5	7.56	670.4	77.14	2697.13	0.972	13.3	13.3	0.1	6.692	0.796	2096.6	2135.65	5948.38	6.47	7.365
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	5	6.4175	6.4175	2833.00	0.916	2833.25	20.68	1.038	2752.5	8.7	640.1	76	2685.93	0.97	14.44	14.44	0.1	6.67	0.809	2113.4	2139.65	6946.64	6.7	7.728
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	4	6.4175	6.4175	2840.20	0.906	2840.56	23.74	1.184	2747.5	10	604.7	74.7	2673.77	0.97	15.74	15.74	0.1	6.74	0.822	2134.9	2148.75	7933.99	6.87	8.054
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	3	6.4175	6.4175	2847.80	0.891	2847.8	26.83	1.408	2742.7	11.56	561.4	73.14	2665.51	0.968	17.3	17.3	0.1	6.82	0.824	2159.6	2157.89	8974.69	6.91	8.338
Presión de escape de la turbina de vapor de 0,2 bar																															
PI	m1	h1	P1	h3	m2	h2	m3	P3	Q	s6	h6i	v6i	h6 Real	PV1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	x7	m7	m8	P8	s7-s8	x8	h8	h8r	PV2	PE2	h6f Tot (MW)
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	15	6.4175	6.4175	2780.2	0.995	2781.35	59.01	0.053	2789.9	0.52	844.7	81.18	2782.06	0.996	6.26	6.26	0.5	6.424	0.82	2231	2286.11	3104.65	2.79	2.893
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	14	6.4175	6.4175	2784.3	0.988	2785.04	41.55	0.117	2787.8	1.15	830.1	83.55	2780.51	0.991	6.89	6.89	0.5	6.4275	0.821	2233.3	2287.02	3331.25	3	3.127
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	13	6.4175	6.4175	2788.4	0.982	2789.08	21.94	0.194	2785.4	1.8	814.7	82.9	2781.56	0.988	7.54	7.54	0.5	6.4401	0.824	2240.2	2292.34	3537.92	3.18	3.374
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	12	6.4175	6.4175	2793.1	0.976	2790.76	7.94	0.263	2782.7	2.48	798.4	82.2	2783.41	0.985	8.22	8.22	0.5	6.465	0.825	2242.6	2293.68	3778.98	3.4	3.663
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	11	6.4175	6.4175	2797.95	0.971	2792.5	3.2	0.335	2779.7	3.2	781.1	81.5	2785.8	0.983	8.94	8.94	0.5	6.475	0.828	2249.5	2298.13	3993.23	3.59	3.995
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	10	6.4175	6.4175	2803.00	0.962	2800.59	5.81	0.429	2776.2	3.95	762.6	80.75	2780.47	0.978	9.69	9.69	0.5	6.485	0.83	2254.1	2301.74	4154.39	3.74	4.219
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	9	6.4175	6.4175	2808.30	0.954	2806.00	8.67	0.549	2772.1	4.76	742.6	79.94	2777.22	0.978	10.5	10.5	0.5	6.519	0.833	2261	2305.62	4465.8	3.97	4.495
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	8	6.4175	6.4175	2813.80	0.944	2811.68	11.64	0.645	2767.5	5.62	720.9	79.08	2771.61	0.975	11.36	11.36	0.5	6.594	0.838	2272.5	2310.91	4940.99	4.09	4.725
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	7	6.4175	6.4175	2819.80	0.934	2819.8	14.63	0.753	2762.5	6.54	697.1	78.16	2767.77	0.974	12.28	12.28	0.5	6.622	0.844	2286.4	2328.54	4656.94	4.19	4.943
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	6	6.4175	6.4175	2826.20	0.926	2826.25	17.65	0.886	2757.5	7.56	670.4	77.14	2697.13	0.972	13.3	13.3	0.5	6.692	0.851	2302.5	2341.96	4732.76	4.25	5.138
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	5	6.3366	6.3366	2833.00	0.916	2833.25	20.68	1.038	2752.5	8.7	640.1	76	2685.93	0.97	14.44	14.44	0.5	6.67	0.867	2323.2	2359.47	4714.08	4.24	5.268
Z7	90.044	981.2	20	908.6	5.78	797.2	86.96	4	6.3366	6.3366	2840.20	0.906	2840.56	23.74	1.184	2747.5	10	604.7	74.7	2673.77	0.97	15.74	15.74	0.5	6.74	0.87	2346.3	2379.05	4638.89	4.18	5.364
Z7	90.044	981.2	20	908.6	5.78	797.2	86.96	3	6.3366	6.3366	2847.80	0.891	2847.8	26.83	1.408	2742.7	11.56	561.4	73.14	2665.51	0.968	17.3	17.3	0.5	6.82	0.881	2371.7	2400.18	4434.51	3.99	5.398
Presión de escape de la turbina de vapor de 1 bar																															
PI	m1	h1	P1	h3	m2	h2	m3	P3	Q	s6	h6i	v6i	h6 Real	PV1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	x7	m7	m8	P8	s7-s8	x8	h8	h8r	PV2	PE2	h6f Tot (MW)
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	15	6.4175	6.4175	2780.2	0.995	2781.35	59.01	0.053	2789.9	0.52	844.7	81.18	2782.06	0.996	6.26	6.26	1	6.424	0.845	2325.4	2317.07	2572.8	2.32	2.273
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	14	6.4175	6.4175	2784.3	0.988	2785.04	41.55	0.117	2787.8	1.15	830.1	83.55	2780.51	0.991	6.89	6.89	1	6.4275	0.846	2327.2	2317.53	2748.97	2.47	2.297
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	13	6.4175	6.4175	2788.4	0.982	2789.08	21.94	0.194	2785.4	1.8	814.7	82.9	2781.56	0.988	7.54	7.54	1	6.4401	0.849	2334.5	2317.21	2998	2.61	2.804
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	12	6.4175	6.4175	2793.1	0.976	2790.76	7.94	0.263	2782.7	2.48	798.4	82.2	2783.41	0.985	8.22	8.22	1	6.465	0.851	2341.8	2316.57	3065.07	2.76	3.023
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	11	6.4175	6.4175	2797.95	0.971	2792.5	3.2	0.335	2779.7	3.2	781.1	81.5	2785.8	0.983	8.94	8.94	1	6.475	0.854	2349.7	2315.71	3149.2	2.9	3.235
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	10	6.4175	6.4175	2803.00	0.962	2800.59	5.81	0.429	2776.2	3.95	762.6	80.75	2780.47	0.978	9.69	9.69	1	6.485	0.857	2358.2	2314.3	3296.25	2.97	3.409
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	9	6.4175	6.4175	2808.30	0.954	2806.00	8.67	0.549	2772.1	4.76	742.6	79.94	2777.22	0.978	10.5	10.5	1	6.519	0.861	2367.6	2312.6	3453.13	3.11	3.655
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	8	6.4175	6.4175	2813.80	0.944	2811.68	11.64	0.645	2767.5	5.62	720.9	79.08	2771.61	0.975	11.36	11.36	1	6.544	0.865	2378.6	2310.4	3537.62	3.18	3.855
Z7	90.044	981.2	16	855.6	5.78	791.7	84.7	7	6.4175	6.4175	2819.80	0.934	2819.8	14.63	0.753	2762.5	6.54	697.1	78.16	2767.77	0.974	12.28	12.28	1	6.592	0.872	2390.4	2318.54	3551.74	3.2	4.065
Z7	90.044	981.2	20	908.6	5.78	797.2	86.96	6	6.4175	6.4175	2826.20	0.926	2826.25	17.65	0.886	2757.5	7.56	670.4	76	2685.93	0.97	13.3	13.3	1	6.622	0.88	2399.5	2329.62	3557.88	3.2	4.065
Z7	90.044</																														

Anexo 11: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 10 bar en el tanque de expansión 1.

Presión de desage de la columna de vapor de 0,1 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P3	Q	s3	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	Per Tot (MW)											
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	8	6.5828	6.5828	2793.00	0.94	2798.94	368.88	0.329	2767.5	1.64	720.9	7839	2745.03	0.988	11.46	11.46	0.1	6.604	0.794	2091.8	2156.97	6716.82	6.05	6.79
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	7	6.5828	6.5828	2710.40	0.95	2716.98	581.54	0.523	2762	2.56	697.1	78106	2716.29	0.983	12.38	12.38	0.1	6.625	0.797	2091	2161.73	6882.25	6.29	6.83
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	6	6.5828	6.5828	2628.50	0.96	2634.87	828.12	0.745	2755.5	3.56	670.4	77106	2708.83	0.977	13.38	13.38	0.1	6.646	0.8	2165.2	2166.46	7256.51	6.53	7.25
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	5	6.5828	6.5828	2646.50	0.95	2652.7	1126.61	1.016	2747.5	4.69	640.1	7539	2689.14	0.972	14.51	14.51	0.1	6.68	0.804	2115.8	2173.13	7487.31	6.74	7.56
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	4	6.5828	6.5828	2690.40	0.94	2696.08	1474.18	1.327	2737.6	5.97	604.7	7465	2688.24	0.967	15.79	15.79	0.1	6.725	0.808	2127.7	2181.75	7681.68	6.91	8.27
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	3	6.5828	6.5828	2553.00	0.93	2559.91	1977.57	1.735	2727.7	7.5	584.4	7312	2682.61	0.962	17.21	17.21	0.1	6.788	0.818	2149.3	2198.63	7688.79	6.92	8.65
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	2	6.5828	6.5828	2497.00	0.95	2503.69	2466.69	2.220	2716.3	9.44	594.7	7118	2683.87	0.958	19.26	19.26	0.1	6.891	0.823	2161.2	2206.47	7846.52	7.06	9.28

Presión de desage de la columna de vapor de 0,5 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P3	Q	s3	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	Per Tot (MW)											
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	8	6.5828	6.5828	2734.8	0.94	2738.94	368.88	0.329	2767.5	1.64	720.9	7839	2745.03	0.988	11.46	11.46	0.5	6.604	0.848	2095.6	2340.34	4614.83	4.15	4.79
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	7	6.5828	6.5828	2710.4	0.95	2716.98	581.54	0.523	2762	2.56	697.1	78106	2716.29	0.983	12.38	12.38	0.5	6.625	0.852	2098.8	2346.95	4696.23	4.23	4.75
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	6	6.5828	6.5828	2680.5	0.96	2686.87	828.12	0.745	2755.5	3.56	670.4	77106	2708.83	0.977	13.38	13.38	0.5	6.646	0.858	2181.6	2357.62	4688.79	4.23	4.95
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	5	6.5828	6.5828	2648.5	0.95	2654.7	1126.61	1.016	2747.5	4.69	640.1	7539	2689.14	0.972	14.51	14.51	0.5	6.68	0.86	2232.2	2391.79	4778.87	4.3	5.16
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	4	6.5828	6.5828	2698.4	0.94	2704.08	1474.18	1.327	2737.6	5.97	604.7	7465	2688.24	0.967	15.79	15.79	0.5	6.725	0.866	2337.1	2370.21	4705.89	4.24	5.57
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	3	6.5828	6.5828	2538.1	0.93	2543.91	1977.57	1.735	2727.7	7.5	584.4	7312	2682.61	0.962	17.21	17.21	0.5	6.788	0.873	2353.2	2382.14	4511.94	4.06	5.75
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	2	6.5828	6.5828	2497.1	0.95	2503.69	2466.69	2.22	2716.3	9.44	594.7	7118	2683.87	0.958	19.26	19.26	0.5	6.891	0.889	2390.1	2422.48	3878.77	3.49	5.71

Presión de desage de la columna de vapor de 1 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P3	Q	s3	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	h6	Per Tot (MW)											
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	8	6.5828	6.5828	2734.8	0.94	2738.94	368.88	0.329	2767.5	1.64	720.9	7839	2745.03	0.988	11.46	11.46	1	6.604	0.876	2095.4	2401.16	3635.49	3.23	3.59
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	7	6.5828	6.5828	2710.4	0.95	2716.98	581.54	0.523	2762	2.56	697.1	78106	2716.29	0.983	12.38	12.38	1	6.625	0.881	2106.7	2408.66	3680.86	3.2	3.72
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	6	6.5828	6.5828	2680.5	0.96	2686.87	828.12	0.745	2755.5	3.56	670.4	77106	2708.83	0.977	13.38	13.38	1	6.646	0.884	2115.5	2413.5	3536	3.2	3.94
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	5	6.5828	6.5828	2648.5	0.95	2654.7	1126.61	1.016	2747.5	4.69	640.1	7539	2689.14	0.972	14.51	14.51	1	6.68	0.888	2122.5	2419.15	3482.11	3.13	4.16
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	4	6.5828	6.5828	2698.4	0.94	2704.08	1474.18	1.327	2737.6	5.97	604.7	7465	2688.24	0.967	15.79	15.79	1	6.725	0.896	2140.6	2463.36	3335.06	2.91	4.27
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	3	6.5828	6.5828	2538.1	0.93	2543.91	1977.57	1.735	2727.7	7.5	584.4	7312	2682.61	0.962	17.21	17.21	1	6.788	0.904	2193.6	2477	2888.37	2.58	4.35
27	91.44	891.2	10	762.6	9.82	2776.2	80.62	2	6.5828	6.5828	2497.1	0.95	2503.69	2466.69	2.22	2716.3	9.44	594.7	7118	2683.87	0.958	19.26	19.26	1	6.891	0.919	2192.5	2504.64	2103.77	1.88	4.11

Nota. Elaboración propia.

Anexo 13: Cálculos para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de 6 bar en el tanque de expansión 1.

Presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P6	Q	Q6	h6	h6 Real	P1V1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	x7	m7	m8	P8	sF-s8	x8	h8	h8r	P1V2	PE2	Per Tot (MW)	
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2755.5	78.94	5	6.7575	6.7575	2722.2	0.988	2725.3	404	0.384	2747.5	1.13	640.1	77.81	2727.29	0.991	14.61	14.61	0.1	6.6769	0.805	2182.3	2179.1	8008.18	7.21	7.574
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2762.2	78.94	4	6.7575	6.7575	2680.00	0.971	2685.6	1167.1	1.05	2771.6	2.43	604.7	76.51	2665.95	0.981	15.91	15.91	0.1	6.797	0.82	2134.1	2208.39	7772.99	7	8.05
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2762.2	78.94	3	6.7575	6.7575	2627.40	0.955	2642.28	1805.24	1.625	2774.7	3.98	561.4	74.96	2661.07	0.971	17.46	17.46	0.1	6.836	0.827	2104.8	2219.83	7704.05	6.99	8.555
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2762.2	78.94	2	6.7575	6.7575	2561.10	0.934	2382.61	2603.59	2.348	2786.3	5.94	504.7	73	2620.44	0.951	19.42	19.42	0.1	6.908	0.835	2100.1	2233.13	7521.56	6.77	9.119
Presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P6	Q	Q6	h6	h6 Real	P1V1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	x7	m7	m8	P8	sF-s8	x8	h8	h8r	P1V2	PE2	Per Tot (MW)	
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	5	6.7575	6.7575	2722.2	0.988	2725.3	404	0.384	2747.5	1.13	640.1	77.81	2727.29	0.991	14.61	14.61	0.05	6.6769	0.808	2316.6	2399.46	5373.12	4.84	5.204
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	4	6.7575	6.7575	2680	0.971	2685.6	1167.1	1.05	2771.6	2.43	604.7	76.51	2666.95	0.981	15.91	15.91	0.05	6.797	0.876	2327.9	2360.1	5359.28	4.82	5.87
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	3	6.7575	6.7575	2627.4	0.955	2642.28	1805.24	1.625	2774.7	3.98	561.4	74.96	2661.07	0.971	17.46	17.46	0.05	6.836	0.883	2376.3	2400.78	4474.82	4.03	5.635
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	2	6.7575	6.7575	2561.1	0.934	2382.61	2603.59	2.348	2786.3	5.94	504.7	73	2620.44	0.951	19.42	19.42	0.05	6.908	0.894	2401.6	2423.48	3824.96	3.44	5.789
Presión de descarga de la turbina de vapor de 1 bar																															
P1	m1	h1	P2	h3	m2	h2	m3	P6	Q	Q6	h6	h6 Real	P1V1	PE1	h4	m4	h5	m5	h7	x7	m7	m8	P8	sF-s8	x8	h8	h8r	P1V2	PE2	Per Tot (MW)	
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	5	6.7575	6.7575	2722.2	0.988	2725.3	404	0.384	2747.5	1.13	640.1	77.81	2727.29	0.991	14.61	14.61	1	6.677	0.885	2415.7	2446.35	4066.35	3.89	4.054
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	4	6.7575	6.7575	2680	0.971	2685.6	1167.1	1.05	2771.6	2.43	604.7	76.51	2666.95	0.981	15.91	15.91	1	6.797	0.906	2463.2	2486.38	3346.99	3.01	4.060
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	3	6.7575	6.7575	2627.4	0.955	2642.28	1805.24	1.625	2774.7	3.98	561.4	74.96	2661.07	0.971	17.46	17.46	1	6.836	0.92	2494.8	2511.43	2612.71	2.35	3.975
27	90.44	981.2	6	670.4	13.48	2797.2	78.94	2	6.7575	6.7575	2561.1	0.934	2382.61	2603.59	2.348	2786.3	5.94	504.7	73	2620.44	0.951	19.42	19.42	1	6.908	0.925	2501	2521.04	1930.35	1.74	4.089

Nota. Elaboración propia.

Anexo 14: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión simple con presión de descarga de la turbina de vapor de 1 bar.

Central geotermica de destello simple-Presion de descarga 1 Bar						
Presion 1T	7	bar				
Costo de instalacion (U\$)		16159572		Costo de conexión(U\$)		301860
Costo total (U\$)		16461432				
Potencia (MW)	Año	Energia anual (MWh)	$\frac{E_i}{(1+i)^n}$	Anualidad (U\$)	C_{OM} (U\$)	$\frac{C_i}{(1+i)^n}$
3.354	1	26442.94	23609.77	2043582.38	385710.00	2169011.05
3.354	2	26442.94	21080.15	2043582.38	385710.00	1936617.01
3.354	3	26442.94	18821.56	2043582.38	385710.00	1729122.33
3.354	4	26442.94	16804.97	2043582.38	385710.00	1543859.23
3.354	5	26442.94	15004.43	2043582.38	385710.00	1378445.74
3.354	6	26442.94	13396.82	2043582.38	385710.00	1230755.12
3.354	7	26442.94	11961.44	2043582.38	385710.00	1098888.50
3.354	8	26442.94	10679.86	2043582.38	385710.00	981150.45
3.354	9	26442.94	9535.59	2043582.38	385710.00	876027.19
3.354	10	26442.94	8513.92	2043582.38	385710.00	782167.13
3.354	11	26442.94	7601.71	2043582.38	385710.00	698363.51
3.354	12	26442.94	6787.24	2043582.38	385710.00	623538.85
3.354	13	26442.94	6060.04	2043582.38	385710.00	556731.11
3.354	14	26442.94	5410.75	2043582.38	385710.00	497081.35
3.354	15	26442.94	4831.03	2043582.38	385710.00	443822.64
3.354	16	26442.94	4313.42	2043582.38	385710.00	396270.21
3.354	17	26442.94	3851.26	2043582.38	385710.00	353812.69
3.354	18	26442.94	3438.63	2043582.38	385710.00	315904.19
3.354	19	26442.94	3070.2	2043582.38	385710.00	282057.31
3.354	20	26442.94	2741.25	2043582.38	385710.00	251836.88
3.354	21	26442.94	2447.55	2043582.38	385710.00	224854.36
3.354	22	26442.94	2185.31	2043582.38	385710.00	200762.82
3.354	23	26442.94	1951.17	2043582.38	385710.00	179252.52
3.354	24	26442.94	1742.12	2043582.38	385710.00	160046.89
3.354	25	26442.94	1555.46	2043582.38	385710.00	142899.01
3.354	26	26442.94	1388.8	2043582.38	385710.00	127588.40
3.354	27	26442.94	1240	2043582.38	385710.00	113918.22
3.354	28	26442.94	1107.15	2043582.38	385710.00	101712.69
3.354	29	26442.94	988.52	2043582.38	385710.00	90814.90
3.354	30	26442.94	882.61	2043582.38	385710.00	81084.74
		Total	213002.73			19568397.04
LCOE o Costo nivelado(U\$/MWh)						91.87

Nota. Elaboración propia.

Anexo 15: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión simple con presión de descarga de la turbina de vapor de 0,1 y 0,5 bar.

Central geotérmica de destello simple- Presión de descarga 0,1 Bar						
Presión 1T	1	bar				
Costo de instalación (U\$)	32857746		Costo de conexión(U\$)	566730		
Costo total (U\$)	33424476					
Potencia (MW)	Año	Energía anual (MWh)	$\frac{E_i}{(1+i)^n}$	Anualidad (U\$)	C_{OM} (U\$)	$\frac{C_i}{(1+i)^n}$
6.297	1	49645.55	44326.38	4149436.70	724155.00	4351421.16
6.297	2	49645.55	39577.13	4149436.70	724155.00	3885197.46
6.297	3	49645.55	35336.72	4149436.70	724155.00	3468926.31
6.297	4	49645.55	31550.64	4149436.70	724155.00	3097255.63
6.297	5	49645.55	28170.22	4149436.70	724155.00	2765406.81
6.297	6	49645.55	25151.98	4149436.70	724155.00	2469113.23
6.297	7	49645.55	22457.13	4149436.70	724155.00	2204565.38
6.297	8	49645.55	20051	4149436.70	724155.00	1968361.95
6.297	9	49645.55	17902.68	4149436.70	724155.00	1757466.02
6.297	10	49645.55	15984.54	4149436.70	724155.00	1569166.09
6.297	11	49645.55	14271.91	4149436.70	724155.00	1401041.15
6.297	12	49645.55	12742.78	4149436.70	724155.00	1250929.60
6.297	13	49645.55	11377.48	4149436.70	724155.00	1116901.43
6.297	14	49645.55	10158.46	4149436.70	724155.00	997233.42
6.297	15	49645.55	9070.06	4149436.70	724155.00	890386.98
6.297	16	49645.55	8098.26	4149436.70	724155.00	794988.38
6.297	17	49645.55	7230.59	4149436.70	724155.00	709811.05
6.297	18	49645.55	6455.89	4149436.70	724155.00	633759.87
6.297	19	49645.55	5764.18	4149436.70	724155.00	565857.02
6.297	20	49645.55	5146.59	4149436.70	724155.00	505229.49
6.297	21	49645.55	4595.17	4149436.70	724155.00	451097.76
6.297	22	49645.55	4102.83	4149436.70	724155.00	402765.85
6.297	23	49645.55	3663.24	4149436.70	724155.00	359612.37
6.297	24	49645.55	3270.75	4149436.70	724155.00	321082.47
6.297	25	49645.55	2920.32	4149436.70	724155.00	286680.78
6.297	26	49645.55	2607.42	4149436.70	724155.00	255964.98
6.297	27	49645.55	2328.06	4149436.70	724155.00	228540.16
6.297	28	49645.55	2078.62	4149436.70	724155.00	204053.72
6.297	29	49645.55	1855.91	4149436.70	724155.00	182190.82
6.297	30	49645.55	1657.07	4149436.70	724155.00	162670.37
	Total		399904.01			39257677.71
LCOE o Costo nivelado(U\$/MWh)						98.17

Nota.

Elaboración propia.

Anexo 16: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de la turbina de vapor de 1 bar.

Central geotermica de destello doble- Presion de descarga 1 Bar						
Presion 1T	8	bar		Presion 2T	2	Bar
Costo de instalacion (U\$)	26646440			Costo de conexión(U\$)	412200	
Costo total (U\$)			27058640			
Potencia (MW)	Año	Energia anual (MWh)	$\frac{E_i}{(1+i)^n}$	Anualidad (U\$)	C_{OM}	$\frac{C_i}{(1+i)^n}$
					(U\$)	
4.580	1	36108.72	32239.93	3359158.54	526700.00	3469516.55
4.580	2	36108.72	28785.65	3359158.54	526700.00	3097782.64
4.580	3	36108.72	25701.47	3359158.54	526700.00	2765877.35
4.580	4	36108.72	22947.74	3359158.54	526700.00	2469533.35
4.580	5	36108.72	20489.06	3359158.54	526700.00	2204940.49
4.580	6	36108.72	18293.8	3359158.54	526700.00	1968696.87
4.580	7	36108.72	16333.75	3359158.54	526700.00	1757765.06
4.580	8	36108.72	14583.71	3359158.54	526700.00	1569433.09
4.580	9	36108.72	13021.17	3359158.54	526700.00	1401279.55
4.580	10	36108.72	11626.04	3359158.54	526700.00	1251142.45
4.580	11	36108.72	10380.39	3359158.54	526700.00	1117091.47
4.580	12	36108.72	9268.21	3359158.54	526700.00	997403.10
4.580	13	36108.72	8275.19	3359158.54	526700.00	890538.48
4.580	14	36108.72	7388.56	3359158.54	526700.00	795123.65
4.580	15	36108.72	6596.93	3359158.54	526700.00	709931.83
4.580	16	36108.72	5890.11	3359158.54	526700.00	633867.70
4.580	17	36108.72	5259.03	3359158.54	526700.00	565953.31
4.580	18	36108.72	4695.56	3359158.54	526700.00	505315.45
4.580	19	36108.72	4192.47	3359158.54	526700.00	451174.51
4.580	20	36108.72	3743.27	3359158.54	526700.00	402834.38
4.580	21	36108.72	3342.21	3359158.54	526700.00	359673.56
4.580	22	36108.72	2984.12	3359158.54	526700.00	321137.10
4.580	23	36108.72	2664.39	3359158.54	526700.00	286729.56
4.580	24	36108.72	2378.92	3359158.54	526700.00	256008.53
4.580	25	36108.72	2124.03	3359158.54	526700.00	228579.05
4.580	26	36108.72	1896.46	3359158.54	526700.00	204088.44
4.580	27	36108.72	1693.27	3359158.54	526700.00	182221.82
4.580	28	36108.72	1511.85	3359158.54	526700.00	162698.05
4.580	29	36108.72	1349.86	3359158.54	526700.00	145266.12
4.580	30	36108.72	1205.23	3359158.54	526700.00	129701.89
Total			290862.38			31301305.40
LCOE o Costo nivelado(U\$/MWh)						107.62

Nota. Elaboración propia.

Anexo 17: Evaluación económica para central geotérmica de destello de expansión doble con presión de descarga de la turbina de vapor de 0,5 y 0,1 bar.

Central geotermica de destello doble- Presion de descarga 0,5 Bar						
Presion 1T	8	bar		Presion 2T	2	Bar
Costo de instalacion (U\$)		38986860		Costo de conexión(U\$)		564300
Costo total (U\$)		39551160				
Potencia (MW)	Año	Energia anual (MWh)	$\frac{E_i}{(1+i)^n}$	Anualidad (U\$)	$\frac{C_{OM}}{(U\$)}$	$\frac{C_i}{(1+i)^n}$
6.270	1	49432.68	44136.32	4910025.66	721050.00	5027746.13
6.270	2	49432.68	39407.43	4910025.66	721050.00	4489059.04
6.270	3	49432.68	35185.21	4910025.66	721050.00	4008088.43
6.270	4	49432.68	31415.36	4910025.66	721050.00	3578650.38
6.270	5	49432.68	28049.43	4910025.66	721050.00	3195223.56
6.270	6	49432.68	25044.13	4910025.66	721050.00	2852878.18
6.270	7	49432.68	22360.83	4910025.66	721050.00	2547212.66
6.270	8	49432.68	19965.03	4910025.66	721050.00	2274297.01
6.270	9	49432.68	17825.92	4910025.66	721050.00	2030622.33
6.270	10	49432.68	15916	4910025.66	721050.00	1813055.66
6.270	11	49432.68	14210.71	4910025.66	721050.00	1618799.69
6.270	12	49432.68	12688.14	4910025.66	721050.00	1445356.87
6.270	13	49432.68	11328.69	4910025.66	721050.00	1290497.20
6.270	14	49432.68	10114.91	4910025.66	721050.00	1152229.65
6.270	15	49432.68	9031.17	4910025.66	721050.00	1028776.47
6.270	16	49432.68	8063.54	4910025.66	721050.00	918550.42
6.270	17	49432.68	7199.59	4910025.66	721050.00	820134.30
6.270	18	49432.68	6428.21	4910025.66	721050.00	732262.77
6.270	19	49432.68	5739.47	4910025.66	721050.00	653806.05
6.270	20	49432.68	5124.53	4910025.66	721050.00	583755.40
6.270	21	49432.68	4575.47	4910025.66	721050.00	521210.18
6.270	22	49432.68	4085.24	4910025.66	721050.00	465366.23
6.270	23	49432.68	3647.54	4910025.66	721050.00	415505.56
6.270	24	49432.68	3256.73	4910025.66	721050.00	370987.11
6.270	25	49432.68	2907.79	4910025.66	721050.00	331238.49
6.270	26	49432.68	2596.24	4910025.66	721050.00	295748.65
6.270	27	49432.68	2318.08	4910025.66	721050.00	264061.30
6.270	28	49432.68	2069.71	4910025.66	721050.00	235769.01
6.270	29	49432.68	1847.96	4910025.66	721050.00	210508.05
6.270	30	49432.68	1649.96	4910025.66	721050.00	187953.61
Total			398189.34			45359350.39
LCOE o Costo nivelado(U\$/MWh)						113.91

Nota. Elaboración propia.