



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

**Determinar las Características de una Central Geotermoeléctrica
en el campo geotérmico Calacoa-Putina en Moquegua**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Pablo Trujillo Julca (ORCID: 0000-0002-7812-4519)

Jack Pérez Ramírez (ORCID: 0000-0003-1162-1278)

ASESOR:

Dr. Aníbal Jesús Salazar Mendoza (ORCID: 0000-0003-4412-8789)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, Transmisión y Distribución

CHICLAYO – PERÚ

2022

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado en primer lugar a toda mi familia, amigos y docente que hicieron posible que mis ganas de salir adelante se vean motivados cada día un poco más.

Pablo Trujillo Julca

La presente tesis se la dedico primeramente a Dios por darnos la sabiduría y la capacidad de razonar. A mis padres y hermano por darme el incentivo emocional durante el proceso mi vida universitaria. A mis compañeros y docentes que brindaron su apoyo y conocimientos para que la elaboración de la tesis sea un éxito.

Jack Pérez Ramírez

Agradecimiento

En primer lugar, agradece a Dios, mis padres y familiares que desde el primer día me motivaron a luchar, a mis docentes, compañeros y todas las personas que aportaron su granito de arena para logra con este meta que es culminar la carrera satisfactoriamente.

Pablo Trujillo Julca

Quiero dar un sincero agradecimiento a Dios por darnos la vida y de manera muy especial mi padres y hermano que día tras día estuvieron presentes dando su apoyo incondicional. Finalmente agradecer a mis docentes y amigos.

Jack Pérez Ramírez

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	24
3.1. Tipo y diseño de investigación	24
3.2. Variables y operacionalización.....	24
3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis	24
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	24
3.5. Procedimientos.....	25
3.6. Método de análisis de datos.....	26
3.7. Aspectos éticos	27
IV. RESULTADOS	28
V. DISCUSIÓN.....	58
VI. CONCLUSIONES.....	62
VII. RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS.....	64
ANEXOS	70

Índice de tablas

Tabla 1. Cuadro comparativo para seleccionar el fluido orgánico de trabajo adecuado para el ciclo binario.....	29
Tabla 2. Ratios para análisis de matriz de ponderación.....	30
Tabla 3. Criterios a considerar para evaluación de matriz de ponderación.....	30
Tabla 4. Matriz de ponderación para escoger la mejor alternativa.....	30
Tabla 5. Especificaciones principales para el desarrollo de la producción de energía eléctrica en los campos geotérmicos potenciales.....	31
Tabla 6. Parámetros para determinar la temperatura en el estado 7.....	33
Tabla 7. Parámetros para determinar la entropía en el estado 7.....	33
Tabla 8. Parámetros para determinar la entalpía en el estado 7.....	33
Tabla 9. Parámetros para determinar el volumen específico en el estado 7.....	34
Tabla 10. Parámetros para determinar la temperatura en el estado 8.....	35
Tabla 11. Parámetros para determinar la temperatura real en el estado 8.....	36
Tabla 12. Parámetros para calcular la temperatura real en el estado 5.....	37
Tabla 13. Parámetros para determinar la entropía real en el estado 5.....	37
Tabla 14. Resumen del Ciclo Rankine Orgánico de potencia.....	41
Tabla 15. Resumen del Ciclo Rankine Orgánico de potencia con software Computer Aided Thermodynamic Tables 3.....	42
Tabla 16. Costos por concepto de exploración.....	47
Tabla 17. Costos por Construcción de pozos y vaporductos.....	47
Tabla 18. Costos para la Planta de Generación Eléctrica.....	47
Tabla 19. Costos por Transmisión.....	48
Tabla 20. Costos por concepto de Subproyectos.....	49
Tabla 21. Resumen de los Costos de Inversión.....	49
Tabla 22. Costos para Operación & Mantenimiento.....	50

Tabla 23. Costos en Permisos	50
Tabla 24. Ingresos por venta de Energía para despacho base	51
Tabla 25. Ingreso por venta de Energía para despacho media punta.....	52
Tabla 26. Ingreso por venta de Potencia para despacho en base	52
Tabla 27. Ingreso por venta de Potencia para despacho en media punta	53
Tabla 28. Costos, gastos e ingresos para determinar la rentabilidad de la central para despacho en base.....	54
Tabla 29. Costos e ingresos para determinar la rentabilidad de la central para despacho en media punta	55
Tabla 30. Resumen de indicadores de rentabilidad para despacho en base	56
Tabla 31. Resumen de indicadores de rentabilidad para despacho en media punta	56
Tabla 32. Expectativa de inflación período 2022-2023.....	57
Tabla 33. Horizontes de evaluación para proyectos de inversión	57

Índice de figuras

Figura 1. Energías renovables disponibles en el mundo	12
Figura 2. Estructura térmica de la Tierra	13
Figura 3. Elementos principales de un sistema geotérmico	14
Figura 4. Características de un Yacimiento Geotérmico	15
Figura 5. Proceso de generación de electricidad empleando energía geotérmica	15
Figura 6. Energía Geotérmica en el mundo.....	17
Figura 7. Potencial Geotérmico en el Perú.....	19
Figura 8. Esquema del Ciclo Rankine ideal y su diagrama termodinámico T-s.....	20
Figura 9. Diagrama termodinámico T-s del Ciclo Rankine real	20
Figura 10. Esquema de un Ciclo Binario Rankine de potencia.....	22
Figura 11. Configuración termodinámica del equipamiento para la central geotérmica.....	32
Figura 12. Esquema con parámetros para intercambiador de calor	38
Figura 13. Distancia de la Central Geotérmica a la Subestación Moquegua	48

Resumen

Para el desarrollo de la presente investigación se planteó como objetivo determinar las características de una central geotérmica empleando un ciclo binario Rankine de potencia para aprovechar el potencial geotérmico con la finalidad de generar energía eléctrica en el campo geotérmico de Calacoa-Putina, ubicado en el departamento de Moquegua, para lo cual se empleó el enfoque cuantitativo de tipo aplicado y diseño de investigación no experimental explicativo. Al dar respuesta a los objetivos planteados, se obtuvieron los siguientes datos: el refrigerante que permite optimizar el Ciclo Binario Rankine de potencia seleccionado de entre varios fluidos de trabajo fue el refrigerante R410a, que tuvo un valor ponderado de 3.80, siendo el mayor de todos al realizar el análisis comparativo; al realizar el análisis termodinámico se calculó un flujo másico para el refrigerante R410a en el Ciclo Binario Rankine de potencia de 4819.466 kg/s y que al llevar a cabo un balance de masa y energía en el intercambiador de calor, se tuvo un flujo másico para el fluido geotérmico de 1165.61 kg/s, todo ello para poder producir una potencia de 100 MW para la central geotermoeléctrica; el equipamiento adecuado con el que debe contar la central geotermoeléctrica para poder producir 100 MW de potencia es una turbina de vapor Siemens SST-500 con una potencia ajustada de 100 MW, un generador de potencia Siemens SGen6-100A-2P con una potencia aparente de ajuste de 140 MVA, ocho bombas de alimentación cada una de 2800 HP de potencia denominada Bomba Grande Power Quintuplex émbolo, un intercambiador de calor Alfa Laval modelo CP150 con una capacidad de 6000 m³/h y un sistema de tuberías para el sistema de extracción e inyección de fluido geotérmico de 14 pulgadas; finalmente los indicadores de rentabilidad son mayores para el despacho en base que para el despacho en media punta, donde se obtuvo un VAN de \$ 155 574 511.00 con una TIR de 30.81% y un tiempo de retorno de la inversión de 3.70 años, demostrando que, para este análisis, el proyecto es rentable, atractivo y con excelentes beneficios para invertir.

Palabras clave: *Energía geotérmica, ciclo binario, central geotermoeléctrica, rentabilidad.*

Abstract

For the development of this research, the objective was to determine the characteristics of a geothermal power plant using a binary Rankine power cycle to take advantage of the geothermal potential in order to generate electrical energy in the Calacoa-Putina geothermal field, located in the department of Moquegua, for which the quantitative approach of applied type and explanatory non-experimental research design was used. In response to the stated objectives, the following data was obtained: the refrigerant that allows optimizing the Binary Rankine Cycle of power selected from among several working fluids was the refrigerant R410a, which had a weighted value of 3.80, being the highest of all when performing the comparative analysis; When performing the thermodynamic analysis, a mass flow was calculated for the refrigerant R410a in the Binary Rankine Cycle with a power of 4819.466 kg/s and when carrying out a mass and energy balance in the heat exchanger, a mass flow was obtained for the geothermal fluid of 1165.61 kg/s, all to be able to produce a power of 100 MW for the geothermal power plant; The appropriate equipment that the geothermal power plant must have in order to produce 100 MW of power is a Siemens SST-500 steam turbine with an adjusted power of 100 MW, a Siemens SGen6-100A-2P power generator with an apparent power of 140 MVA adjustment, eight feed pumps each with a power of 2800 HP called Bomba Grande Power Quintuplex piston, an Alfa Laval model CP150 heat exchanger with a capacity of 6000 m³/h and a piping system for the extraction and injection system 14-inch geothermal fluid; Finally, the profitability indicators are higher for the base dispatch than for the midpoint dispatch, where a NPV of \$155,574,511.00 was obtained with an IRR of 30.81% and a return time of the investment of 3.70 years, showing that , for this analysis, the project is profitable, attractive and with excellent benefits to invest.

Keywords: *Geothermal energy, binary cycle, geothermal power plant, profitability.*

I. INTRODUCCIÓN

El uso de la energía eléctrica hoy en día es indispensable para el ser humano, ya que está sirviendo para iluminar su vida por las noches o en lugares de poca iluminación hasta para poder mover grandes máquinas para el sector industrial. Actualmente, el uso de la energía eléctrica es indispensable para el desarrollo de un país, ya sea desde su uso doméstico hasta el sector industrial, debido a que proporciona la energía suficiente para mover grandes máquinas para la producción de diferentes productos a nivel nacional y mundial.

A nivel mundial, de acuerdo con el informe respecto al estado mundial de las Energías renovables, se puede decir que la energía geotérmica obtuvo un 0.4% de participación sobre la generación de energía eléctrica en el período 2018, incluyendo la energía mareomotriz y la solar concentrada (CPS referente a sus siglas en el idioma inglés). Lund y Boyd (2016) mencionan que 83 países han empleado la energía geotérmica, con respecto al uso térmico. Por ejemplo, China posee una capacidad instalada de 17 870 MW, Estados Unidos con 17 415.91 MW, Suecia con 5 600 MW, Turquía con 2 886.30 MW, Alemania con 2 848.60 MW, Francia con 2 346.90 MW, Japón con 2 186.17 MW, Islandia con 2 040 MW, entre otros con una capacidad de 17 134 MW.

A nivel internacional, ciertos países como China, Japón, India, Países Bajos, Rusia y Estados Unidos tienen una producción de electricidad importante por medio de las centrales termoeléctricas, las mismas que utilizan turbinas de vapor a condiciones supercríticas y siguen aumentando la generación de energía eléctrica con base en el carbón, Li et al. (2018). Además, Prieto y Paredes (2019) manifiestan que las tecnologías nuevas en base a la energía nuclear utilizando reactores de 4ta generación emplearán ciclos de vapor ultracríticos y supercríticos. Por lo tanto, las centrales eléctricas supercríticas desempeñarían un papel importante en la reducción del consumo de carbón y las emisiones contaminantes de la industria de generación de electricidad en todo el mundo. (Stępczyńska-Drygas et al., 2013)

El uso de la energía geotérmica en el Perú está empezando a tomar importancia debido a su potencial energético y porque no contamina al medio ambiente, siendo

una gran alternativa frente a las energías convencionales empleadas actualmente para generar energía eléctrica.

El consumo de energía eléctrica en el Perú durante el año 2020 fue de 8 254 MW en potencia y 62 968 GWh en energía, con un aumento para el año 2021 de 8 535 MW en potencia y de 65 205 GWh en Energía, teniendo una diferencia de 281 MW referente a potencia, esto es, considerando un crecimiento del PBI del 4.5% donde dicha potencia deberá ser suministrada por nuevos proyectos de generación eléctrica, debido a este déficit de energía, es que el presente proyecto busca suministrar una parte para mitigarlo.

Además, el país tiene una alta dependencia de los hidrocarburos, los mismos que representan el 72% que se necesita para cubrir la demanda energética, pero esto es incoherente, dado que el país posee un potencial alto en energías renovables. (Gamio Aita, 2017)

Es por eso que se busca generarla de forma más limpia, evitando la contaminación del medio ambiente, donde el uso de la energía geotérmica se está volviendo cada día más popular debido a sus excelentes prestaciones y capacidad para generar electricidad, además de otras aplicaciones para climatización y calefacción.

En el campo de la energía, el ahorro de energía y la protección del medio ambiente son dos temas principales que han llamado la atención del mundo (Feng et al., 2016).

Más grave aún, la carga operativa de las unidades térmicas continúa reduciéndose debido a la recesión económica. Por estas razones, las grandes unidades térmicas frecuentemente funcionan a baja carga, es decir, el tiempo de funcionamiento de carga parcial representa una gran parte del tiempo total de funcionamiento de la unidad (Ji Zhen et al., 2015).

Bajo esa premisa, es que el presente proyecto se enfocará en determinar las características para una central geotérmica en el campo geotérmico Calacoa-Putina, para determinar si es viable la generación de energía eléctrica a partir de energía geotérmica para la matriz energética en el Perú.

Los objetivos de la investigación son:

Objetivo General

- Determinar las características de una central geotérmica empleando un ciclo binario Rankine de potencia para aprovechar el potencial geotérmico con la finalidad de generar energía eléctrica en el campo geotérmico Calacoa-Putina, ubicado en el departamento de Moquegua.

Objetivos Específicos

- a. Seleccionar el fluido orgánico de trabajo con el fin de optimizar el ciclo binario Rankine de potencia.
- b. Determinar el flujo másico del fluido orgánico de trabajo y del fluido geotérmico en el ciclo binario Rankine de potencia.
- c. Seleccionar el adecuado equipamiento que formará parte de la central geotérmica.
- d. Determinar los indicadores de rentabilidad del proyecto para la central geotérmica.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

Contexto Internacional

Martínez Ruiz et al. (2021) en su artículo “Análisis de opciones reales para la valoración financiera de proyectos de energía geotérmica en Colombia” manifiestan que los proyectos de inversión con referencia en energía, se evalúan empleando métodos y técnicas clásicas, asumiendo que el panorama se mantiene estático con respecto a los flujos de efectivo, lo que resulta realmente insuficiente ya que no se consideran ciertos riesgos vinculados a las variables de entrada y sin tener en cuenta la flexibilidad de aquellos inversionistas, lo cual se relaciona directamente para la toma de decisiones. Se planteó como objetivo general evaluar la viabilidad financiera de los proyectos de inversión en energía geotérmica en Colombia, donde se debe tener consideración sobre el riesgo e incertidumbre que conllevan estos proyectos. Empleando la simulación de Monte Carlo con el fin de conocer la viabilidad financiera del proyecto considerando y aplicando criterios clásicos de la literatura. Los resultados se compararon con los obtenidos al emplear un enfoque de opciones de carácter real al caso de estudio, el mismo que se evaluó partiendo de una opción real compuesta durante el tiempo de inversión. Del análisis se determinó que utilizando las técnicas y métodos clásicos, se puede clasificar al proyecto como no viable, no obstante, al considerar la flexibilidad de la inversión, el resultado fue atractivo. Entonces, a la hora de determinar la viabilidad financiera de una inversión, se debe tener en cuenta los factores de incertidumbre y riesgo.

Rivera Delgado et al. (2021) en su artículo “Transición energética, innovación y usos directos de energía geotérmica en México: Un Análisis de modelado temático” se hizo un análisis de los factores que se relacionan con el desarrollo y la divulgación del conocimiento además de la innovación para las tecnologías vinculadas para el uso directo de energía geotérmica (UDEG) en México, considerando políticas que sirvan para la transformación energética en el lapso de 2008-2019. Se empleó el enfoque SIT o Sistemas de Innovación Tecnológica, debido a su potencial para determinar los mecanismos que se vinculan con el desarrollo y la difusión de un tipo de tecnología emergente en un sistema

determinado. Esto implicó la elaboración de dos modelos temáticos de ALD o Asignación Latente de Dirichlet, donde los resultados demostraron que el SIT para UDEG en México está en etapa de formación y responde al motor del empuje de la ciencia y tecnología.

El Haj Assad et al. (2021) en su artículo de investigación “Análisis de energía y exergía de una planta de energía geotérmica de flash único a la temperatura óptima del separador” llevaron a cabo un análisis termodinámico que consistió en analizar la energía y exergía para lograr determinar el rendimiento de una planta de energía geotérmica del tipo flash simple. Se logró obtener una nueva derivación para la determinación de la temperatura óptima del separador, arrojando como resultado la potencia máxima de salida en la turbina. El análisis de energía y exergía se llevo a cabo bajo esta temperatura óptima en el separador. La derivación termodinámica mostró que el separador daría como resultado el máximo rendimiento de la planta de energía cuando opera al valor promedio de las temperaturas del pozo de producción y del condensador. Además, la derivación se validó numéricamente mediante el cálculo de tres valores diferentes para las temperaturas del pozo geotérmico. Los resultados muestran que el máximo índice de destrucción de exergía se encuentra en la válvula de expansión seguida de la turbina de vapor, el proceso de mezcla y la bomba. El separador tiene una tasa de destrucción de exergía exactamente cero, mientras que el condensador tiene una tasa de destrucción de exergía casi nula. Los resultados también muestran que la tasa de destrucción de exergía para todos los componentes de la planta de energía disminuye con la reducción de la temperatura del geofluido del pozo de producción, excepto el condensador. La máxima eficiencia energética de la central es de 12,5; 11 y 9,5% cuando la temperatura del geofluido del pozo geotérmico es de 300, 275 y 250°C, respectivamente.

El autor **Acosta Ospina (2020)** en su investigación sobre una “Propuesta para el desarrollo de un Proyecto en Cascada en el Municipio de Villamaría, Caldas” desarrollado en Bogotá – Colombia, el objetivo general era de plantear un proyecto empleando energía geotérmica, dispuesto en cascada, donde para lograr este objetivo, empezó describiendo las formas de como usar y aprovechar el recurso geotérmico teniendo en cuenta aspectos medio ambientales, sociales y

económicos de los proyectos donde se usan para generar electricidad. Luego, define los elementos básicos suficientes para poder desarrollar un proyecto geotérmico en cascada, considerando características ambientales y socioeconómicas. Posteriormente, identifica las características adicionales que se deberán abordar en las diferentes regiones del país que cuentan con potencial geotérmico, para proyectos de cualquier otra modalidad o similares.

El autor concluye que las energías renovables se han vuelto el centro de atención a nivel mundial, como una alternativa potencial para la reducir la contaminación ambiental, además del potencial económico que ofrecen a las comunidades que cuentan con dicho recurso.

Basosi, Bonciani, Frosali, & Manfrida (2020) realizaron un análisis del ciclo de vida para la evaluación del desempeño ambiental de 3 centrales eléctricas italianas existentes de potencias nominales comparables que operaban con diferentes fuentes de energía renovable: eólica, solar y geotérmica. Los datos primarios se utilizaron para construir los inventarios del ciclo de vida. Los resultados se caracterizaron por emplear un amplio portafolio de indicadores ambientales empleando los métodos ReCiPe 2016 e ILCD 2011 Midpoint+; la normalización y la ponderación también se aplicaron utilizando el método ReCiPe 2016 a nivel de punto final. Los resultados intermedios demostraron un buen perfil ecológico de la planta de energía geotérmica en comparación con otros sistemas de energía renovable y un avance definitivo en el desempeño de la matriz energética nacional. El cálculo de la puntuación única de Eco Point mostró que la energía eólica es la mejor tecnología con un valor de 0,0012 Ecopuntos/kWh, un resultado en línea con estudios de análisis de ciclo de vida documentados previamente. No obstante, la central geotérmica alcanzó un valor de 0,0177 Ecopuntos/kWh, cercano al calculado para la planta fotovoltaica (0,0087 Ecopuntos/kWh) y muy inferior al mix energético nacional (0,1240 Ecopuntos/kWh). Además, un análisis de escenario permitió una discusión crítica sobre las posibles mejoras en el desempeño ambiental de la planta de energía geotérmica.

Guerrero Cevallos (2019) menciona en su investigación “Estudio y optimización para la perforación de Pozos Geotérmicos en Ecuador basados en la experiencia

del Pozo Exploratorio Chachimbiro 1” desarrollada en la ciudad de Quito, Ecuador; propuso como objetivo general el poder identificar las oportunidades de mejora para la perforación del pozo PEC1 con el fin de optimizar la ejecución de futuros pozos del proyecto geotermico Chachimbiro. Para lograr el desarrollo de este objetivo se identifico los eventos durante la perforación del pozo PEC 1, analizo la dificultad de construcción del perfil del pozo PEC 1, evaluó el desempeño de los ensamblajes de fondo del fondo de pozo PEC 1, identificó los procedimientos y operaciones de contingencia que se aplicaron durante la perforación del Pozo PEC 1, y optimizó las prácticas operacionales de perforación aplicadas en el pozo geotérmico PEC 1. El autor concluyó que el diseño de la trayectoria direccional del pozo PEC 1, permitió emplear de forma exitosa herramientas con tecnología para temperaturas convencionales y en condiciones de pérdida de fluido parcial o total, optimizando la producción del pozo, obteniéndose un aumento de dicha producción.

Pantoja Lara y Parancan Raipane (2016) en su investigación sobre el “Análisis de la Energía Geotérmica para su implementación en el Área de Salud específicamente Hospitales y CESFAM de la ciudad de Puerto Montt – Calbuco ,Región de Los Lagos”, los objetivos propuestos fueron; establecer aquellos factores importantes que requieren el uso de la fuente de energía geotérmica en los Hospitales y CESFAM, y ver en que medida afecta el poder implementarlas. El autor empleó un enfoque cualitativo, debido a que el modelo no ha sido investigado con un instrumento que determine cuáles son los factores que afectan el poder implementar un sistema geotérmico en los centros de salud de dichas ciudades. El alcance de la investigación es descriptivo, debido a que se busca determinar cuales son aquellos factores que inciden en el uso de la energía geotérmica, para su posterior análisis.

Al final el autor concluyó que un factor relevante es la eficiencia, es decir, la relación Costo/Utilidad que conlleva el uso de dicha energía, reducir el impacto ambiental es otro factor relevante, ya que la energía geotérmica es ecoamigable, obtener beneficios económicos en un futuro debido a los bonos verdes promovidos a nivel mundial, que se tenga apoyo gubernamental y un amplio conocimiento científico referente a la energía a emplear.

Sinaga & Darmanto (2016) en su artículo titulado “Modelado de optimización de energía de una planta de energía geotérmica (Estudio de caso: Unidad III del campo geotérmico de Darajat)” llevaron a cabo el análisis para la planta geotérmica Darajat unidad III, la cual es operada por PT Indonesia Geotérmica de Chevron (CGI). La planta posee una potencia de 121 MW y con una carga del 110%. Se pudo determinar que el mayor consumo de potencia la utilizada la bomba de pozo caliente (HWP) además del ventilador de la torre de refrigeración (CTF). Para reducir la potencia de la red se utilizo la fluctuación de la temperatura de bulbo húmedo. Para este caso de estudio, se desarrollo un modelado empleando el software Engineering Equation Solver (EES) v9.43. Se obtuvo un posible ahorro de energía mediante el consumo específico de vapor neto (SSC) con relación a la variación de la temperatura de bulbo húmedo de 9°C a 20.5°C. Se obtuvo como resultado que la operación del día a día alcanzaba si óptima condición. Se logró demostrar que al instalar un variador de frecuencia (VFD) se podría optimizar la energía de la red pública de HWP y CTF, donde la ganancia más alta se obtiene en la instalacion del VFD y HWP hasta en aproximadamente 0.80% cuando la temperatura de bulbo húmedo alcanza los 18.5°C.

Contexto Nacional

Quispe Huayta (2021) indica en su proyecto de investigación titulado “Análisis y evaluación del potencial geotérmico para su aprovechamiento mediante una Central de Ciclo Binario para generación de potencia eléctrica en la ciudad de Putina, Región de Puno – Perú”, que el objetivo fue el diseñar una central geotermoeléctrica de ciclo binario, la cual empleará un Ciclo ORC (Ciclo Rankine Orgánico), donde se aprovecha el agua termal de la ciudad de Putina, en la región de Puno. Donde se propone disminuir la contaminación del medio ambiente, aumentado la matriz energética del país, al mismo tiempo se satisface y provee de forma limpia la energía eléctrica generada. El autor empleó el tipo de investigación aplicada y descriptiva, donde se utilizaron las teorías de la ciencia de la Ingeniería con el fin de lograr un diseño favorable para dicha central geotermoeléctrica. Al realizar el análisis termodinámico, el fluido de trabajo utilizado fue el Isobutano, debido a que posee una temperatura baja de ebullición, con excelente propiedades que lo hacen resistente a cambios repentinos de presión y temperatura; esto es

considerando un flujo másico constante al igual que la temperatura, adicionalmente, se emplean las eficiencias de los equipos del ciclo como generador, turbina, intercambiador de calor. Se obtuvo un flujo masico de 66.369 kg/s de isobutano y 162.105 kg/s de fluido geotérmico. Con estos datos y bajo la configuración empleada, la central produce 1.5 MW de potencia, obteniéndose una eficiencia de planta de 5.623%.

En el trabajo de investigación de **Curi Yauri (2021)** respecto a la “Evaluación de la generación eléctrica con recurso geotérmico en la región Sur Peruana”, relata de forma conceptual sobre tres tecnologías empleadas para la generación de electricidad con energía geotérmica. El objetivo general del trabajo fue recopilar información sobre las alternativas para dar solución sobre el déficit de generacion eficiente a desarrollarse en la zona Sur del Perú en el 2024 (Escenario pre-COVID).

Se evaluo 3 diferentes tipos de centrales geotérmicas para generar electricidad (central boca de pozo, destello simple y ciclo binario). Revisando los conceptos relacionados a la energía geotérmica, además de sus múltiples aplicaciones. Luego, se detalla el potencial geotérmico disponible en el país. Para finalmente detallar información importante sobre el mercado eléctrico nacional y el marco legal relacionado.

Se concluyo que el departamento de Tacna tiene un alto potencial geotérmico, el cual puede ser empleado para satisfacer el déficit energético de energía eléctrica. Se recomienda la evaluación de dos tecnologías, debido su bajo costo para implementarlas, las cuales son las centrales de destello simple y boca de pozo.

Gutierrez Paco y Quispe Carlo (2018) en su tesis titulada “Evaluación del potencial geotérmico de baja temperatura para aplicaciones de calefacción con bombas de calor”, el objetivo general fue evaluar cual era el potencial de energía geotérmica de baja temperatura disponible en Paucarcolla. Para lograr este objetivo plantea determinar cual es el área requerida de terreno con la finalidad de lograr una correcta temperatura de operación. Además de determinar si es factible el uso de la energía geotérmica en viviendas. Calcular la eficiencia de acuerdo al sistema empleado y a los datos recopilados. Concluyendo que en Paucarcolla si se tiene un potencial geotérmico a una profundidad de 2 metros, considerando que son

constantes las temperaturas con respecto al tiempo, donde la máxima temperatura es de 14 °C, una mínima temperatura de 12.60 °C y una temperatura promedio de 13.41 °C. Para calcular el área correcta del terreno, está depende de la elección de configuración, donde se empleó tubos Slinky y una configuración horizontal, se obtuvo un potencial térmico de 8.3 kW para calefacción, donde la longitud necesaria de tubería fue de 694.02 metros, con un total de 150 m². Se determinó que es posible emplear este tipo de climatización en la localidad empleando una configuración horizontal, debido a que la configuración vertical posee un elevado costo para la perforación de más de 15 m de profundidad, porque el suelo es rocoso. El COP obtenido en la bomba de calor es de 4.5 a 6.

Vásquez Cordano, Tamayo Pacheco, & Salvador Jácome (2017), en su publicación titulada “La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático”, abordan aspectos económicos y tecnológicos de la producción de energía eléctrica partir de recursos renovables no convencionales y ayudando a bajar las emisiones de CO₂ (como la energía nuclear). Tratan de tecnologías que están actualmente muy desarrolladas, como la geotérmica, solar, etcétera

Contexto Local

Bulnes Jiménez (2018), en su proyecto de tesis con título “Dimensionamiento y selección de uan Central Geotérmica basada en el ciclo Rankine Orgánico ubicada en el Yacimiento Jesús María – Moquegua” planteó como objetivo dimensionar y seleccionar una central geotérmica empleando un ciclo binario ORC (Ciclo Orgánico Rankine) con el fin de aprovechar los campos geotérmicos de entalpía media pertenecientes al Campo Geotérmico denominado Jesús María, ubicado en el departamento de Moquegua. El autor indica que se desarrolló dicha investigación con el propósito de disminuir la contaminación al medio ambiente, poder satisfacer el aumento de la demanda en electricidad y basándose en el informe titulado “Evaluación y Caracterización del Potencial geotérmico del departamento de Moquegua” se pensó en producir electricidad utilizando un Ciclo Rankine Binario de potencia para explotar la energía geotérmica contenida en el Campo Jesús María. Se empleó la investigación aplicada y descriptiva ya que se emplearon los

conocimientos y bases teóricas de la ingeniería para poder dimensionar adecuadamente la central geotermoeléctrica. Al desarrollar la investigación, se determinó que de la central geotermoeléctrica se puede generar 4.5 MWe de potencia instalada. El equipamiento que forma parte de la central es: generador síncrono, turbina de vapor, precalentador, condensador de superficie, bomba de condensado, evaporador o intercambiadores de calor, bomba de reinyección, torre de enfriamiento, sistema de tuberías, y se utilizó como fluido orgánico de trabajo al Isobutano. Se obtuvo un flujo másico de 101.1 kg/s para el fluido de trabajo. El costo de inversión que requiere la central geotermoeléctrica fue de S/. 56 000 000, con unos ingresos de S/. 17 416 020 al año por concepto de venta de energía. Del análisis de rentabilidad se tuvo un Valor Actual Neto de S/. 60 694 413, con una Tasa Interna de Retorno del 12%, indicando que dicho proyecto es rentable, atractivo para las invertir y altamente factible.

2.2. Recurso Energético Renovable

El recurso energético del tipo renovable abarca múltiples categorías diferentes de tecnología. Esto se puede explicar de forma que permiten generar y suministrar energía eléctrica, térmica y mecánica, teniendo la capacidad de producir combustibles para cubrir un sinfín de necesidades en lo que respecta a servicios energéticos. Existen tecnologías que emplean energías renovables, donde pueden ser usadas de forma descentralizada en medios urbanos y rurales, en cambio, otras son implantadas generalmente en redes de suministro de gran tamaño, de forma centralizada. (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2016)

Además, debido a la participación de varias fuentes de energía renovables, como la generación de energía eólica, solar, etc., que hace que la mayoría de los parámetros ultra críticos de las unidades de energía térmica generalmente participen en la carga máxima. (Zhou et al., 2016)

Se define a la energía geotérmica como aquel calor que se deriva del subsuelo de la Tierra. La mezcla de líquido saturado y vapor saturado trasladan la energía directamente al espacio donde se utilizará. Esta energía depende de ciertas particularidades, además de poder ser empleada con fines de refrigeración y

calefacción, o también puede aprovecharse para la generación de electricidad limpia. Pero, para poder generar electricidad es necesario contar con un recurso geotérmico con una temperatura media o alta, los cuales generalmente se encuentran muy cerca de regiones con actividad tectónica. (IRENA, 2021)



Figura 1. *Energías renovables disponibles en el mundo*

Fuente: (Michea et al., 2019)

2.2.1. Energía Geotérmica

Es la energía calorífica que contiene el interior de la corteza terrestre, la cual se puede obtener al aprovechar el calor dentro de la Tierra. Es decir, que hay un tipo de energía guardada dentro de la Tierra. Dicha energía se origina de forma exclusiva de dos fuentes, aquella energía producida por el Sol y la que proviene de la Tierra. (Cárcel & Martínez, 2015)

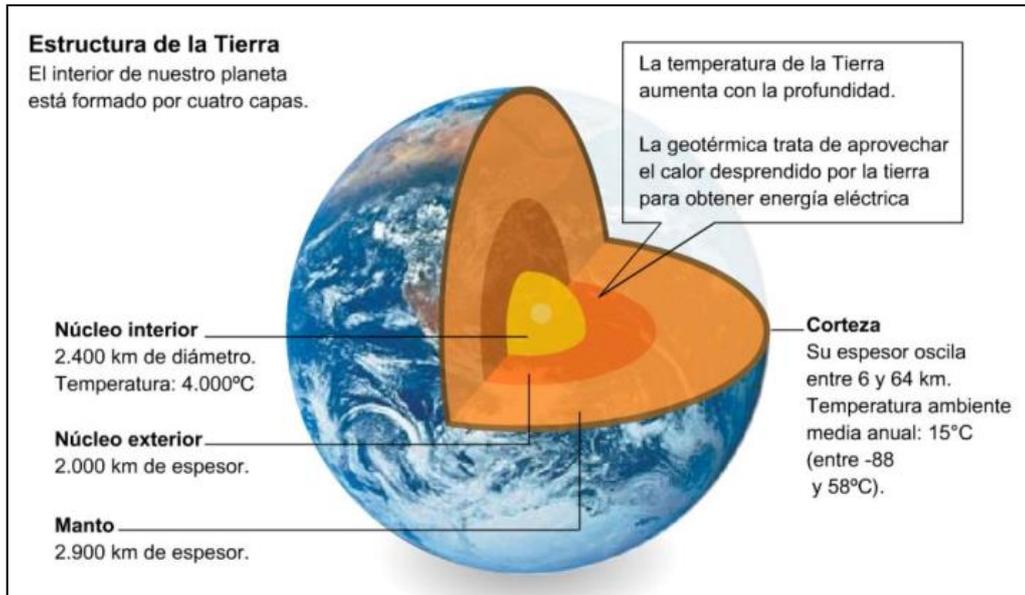


Figura 2. Estructura térmica de la Tierra

Fuente: (Cárcel Carrasco & Martínez Márquez, 2015)

El calor se puede transportar de tres formas diferentes: radiación, convección y conducción. En el subsuelo, ocurren principalmente por convección y conducción. La convección es un proceso de transferencia de calor que ocurre principalmente en líquidos y gases y consiste en el movimiento de fluidos y gases de un lugar a otro causado por una diferencia en la flotabilidad.

La conducción utiliza el principio de energía cinética para transferir calor.

La conducción de calor ocurre principalmente en sólidos y, en términos generales, los metales son buenos conductores de calor, mientras que las rocas son malos conductores.

Dentro de las diferentes zonas de la Tierra, generalmente, la transferencia de calor basada en la convección ocurre en el núcleo externo líquido, y la transferencia de calor basada en la conducción ocurre en el manto sólido y el núcleo externo, debido a su carácter sólido. Tanto la convección como la conducción de calor ocurren en la corteza y juegan un papel importante durante la producción de un reservorio geotérmico. (De Brujin, 2020)

2.2.2. Gradiente Geotérmico

Al existir una diferencia de temperatura entre la superficie de la Tierra y las de su interior, ocasionan un flujo de forma continua de calor, donde la energía que llega a la superficie terrestre, se propaga por convección y conducción. (ver Figura 3).

El calor de la Tierra se origina a partir de dos fuentes: el calor original de la formación de la Tierra por colapso gravitacional y la desintegración radiactiva de varios isótopos. En áreas normales del mundo, la temperatura aumenta en función de la profundidad a una tasa bastante constante de 3 °C por 100 m. Sin embargo, en regiones anómalas asociadas con actividad volcánica o tectónica, el gradiente de temperatura es de 10 a 30 veces más alto de lo normal.

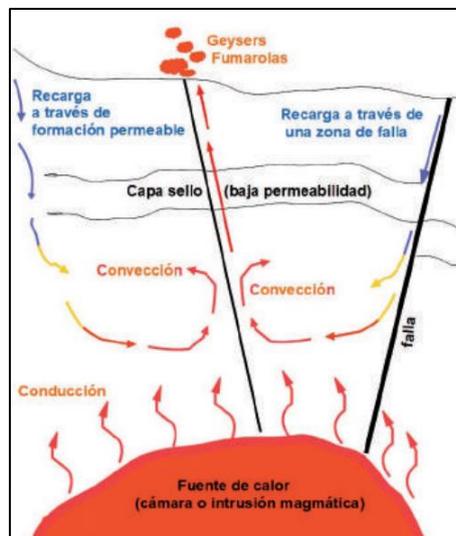


Figura 3. Elementos principales de un sistema geotérmico

Fuente: (Palacio Villa et al., 2020)

2.2.3. Yacimiento Geotérmico

Para poder llevar a cabo la explotación de forma rentable y económica en un yacimiento geotérmico, es importante tener un medio que permita transportar la energía a la superficie terrestre, es por ello que el beneficio de la energía geotérmica está relacionada con existencia de una irregularidad geológica que se denomina yacimiento o reservorio geotérmico, el cual reside en una cavidad que contiene fluidos atrapados a presión alta (litostática) y con una temperatura alta o media (ICGC, 2019).

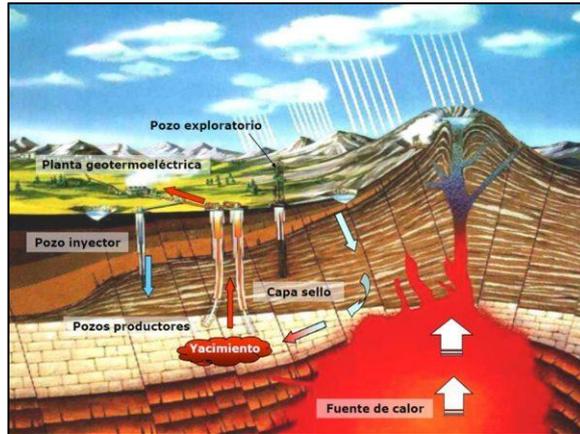


Figura 4. Características de un Yacimiento Geotérmico
Fuente: (Ecología Hoy, 2021)

2.2.4. Como se genera energía eléctrica

Según el IGA (2018), las tecnologías utilizadas para generar energía eléctrica a partir de la energía geotérmica permiten emplear directamente las temperaturas altas del vapor obtenido, la mezcla de vapor y líquido saturado, donde se emplea tecnologías Flash o el agua geotermal con temperaturas intermedias entre 70 a 250°C, empleando tecnología binaria.

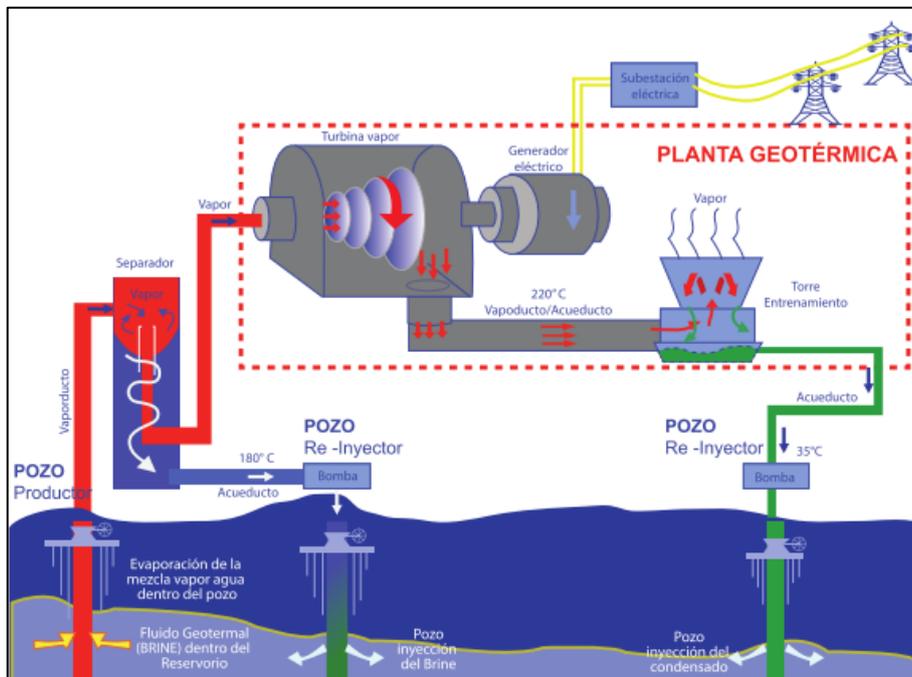


Figura 5. Proceso de generación de electricidad empleando energía geotérmica
Fuente: (Vásquez Cordano et al., 2017)

Las plantas geotermoeléctricas son centrales térmicas que se usan para generación de energía eléctrica de forma constante, esto, debido que se ha comprobado que el uso de la energía contenida en las entrañas de la Tierra en donde estará instalada la termoeléctrica es viable y éstas pueden tener una producción y vida útil de 20 años, produciendo electricidad de manera constante. (Salazar-Pereyra et al., 2017)

Según El Haj Assad et al. (2017) al realizar un análisis comparativo entre las plantas Single Flash, Double Flash y Binary en términos de energía generada, rendimiento e inversión relacionado; los resultados mostraban que la planta de energía Binary presentaba el mejor rendimiento y el costo más bajo.

Negawo (2016) revisó algunos aspectos de los geomateriales de la energía geotérmica para mostrar y discutir el papel de los geomateriales en la utilización de la energía geotérmica. Esta investigación se enfoca en analizar las centrales eléctricas de energía geotérmica para mejorar su rendimiento y aumentar la dependencia de las fuentes de energía renovable donde la energía geotérmica representa el 2% del total de los recursos de energía renovable (Pazheri et al., 2015)

2.2.5. Energía Geotérmica en el mundo

La data respecto a la contribución de la energía geotérmica en el ámbito energético a escala mundial aún tiene inconvenientes a la hora de determinarlo, sobre todo en lo que respecta a la contribución térmica. Además, puede decirse que en 2018 la generación de electricidad a partir de la explotación del recurso geotérmico asciende a 130 GW, un aumento del 6,5% con respecto al 2017, que fue de 121 GW. El potencial para la generación de electricidad empleando energía geotérmica a escala mundial es de alrededor de 70 y 80 GW. Pero, se puede decir que el 15% de las provisiones geotérmicas que se conocen a nivel mundial, se explota para generar electricidad, generándose solo 13 GW. En el año 2018 se registró una capacidad en relación a energía geotérmica instalada en todo el mundo de más de 14 000 MW.

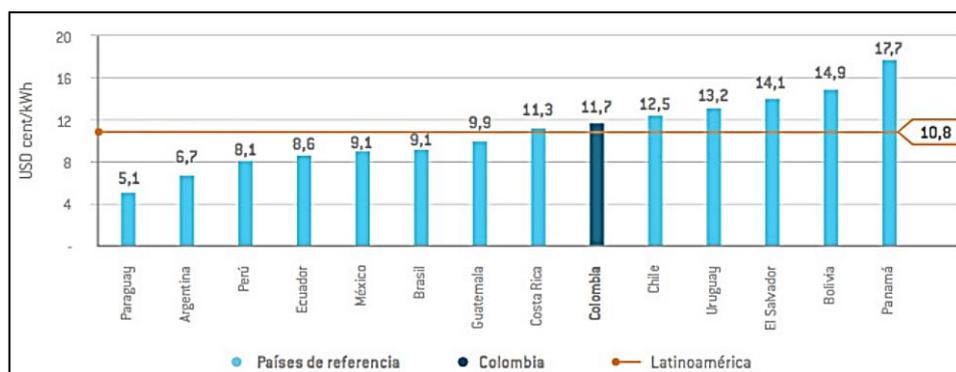


Figura 6. *Energía Geotérmica en el mundo*

Fuente: (Porrás et al., 2018)

Se realizó un estudio con base en los parámetros de ubicación incorporados para Ginebra en Suiza en un momento en que países como Pakistán y Etiopía comenzaron a depender de la energía geotérmica. La fuente geotérmica disponible bajo tierra de Ginebra es un recurso hidrotermal. (Younas et al., 2016)

El potencial geotérmico en Turquía y la Península Biga, es significativo para emplearse en diferentes áreas, aunque, aún hay una preocupación debido al poco conocimiento con respecto a los cambios o efectos ambientales. (Çetiner et al., 2016)

Los países de Europa como Italia, Hungría, Polonia, Macedonia, Serbia, Eslovaquia y Rumania, han aceptado de forma pública la utilización de energías renovables y la geotérmica aún prevalece, siendo evaluada como viable y altamente aceptable. (Kępińska & Kasztelewicz, 2015)

2.2.6. Energía Geotérmica en el Perú

En el Perú, ya se cuenta con un marco normativo que apoya la incorporación de nuevas centrales de generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica, además, ya se cuenta con un Plan Maestro para incentivar el desarrollo de la Geotermia. De dicho plan, se pueden mencionar 61 zonas con un gran potencial de desarrollo, estimando que se podría lograr generar hasta 3000 MW de potencia instalada para la producción de electricidad partiendo de la energía geotérmica. De las cuales, alrededor del 50% se ubican en la zona sur del país.

Lograr satisfacer el aumento en la demanda de electricidad y además conservar el medioambiente es en realidad uno de los más grandes retos que debe asumir las

naciones; para el caso del Perú, quien cuenta con una múltiple variedad de fuentes de energías renovables, siendo la geotérmica una de ellas. El país concentra un potencial de más del 50% de energía geotérmica en la zona Sur, existiendo una ventaja natural comparativa que aún no se aprovechado. El mundo cuenta con una capacidad geotérmica instalada de 16 GW para producir electricidad y el Perú posee un potencial que asciende a 3 GW, enfatizando que dicha energía se encuentra concentrada en más del 50% en la zona sur.

Para poder reducir cualquier tipo de impacto medio ambiental, se deben elegir sitios con una densidad poblacional baja o pequeña para el desarrollo de proyectos geotérmicos. (Meier et al., 2015)

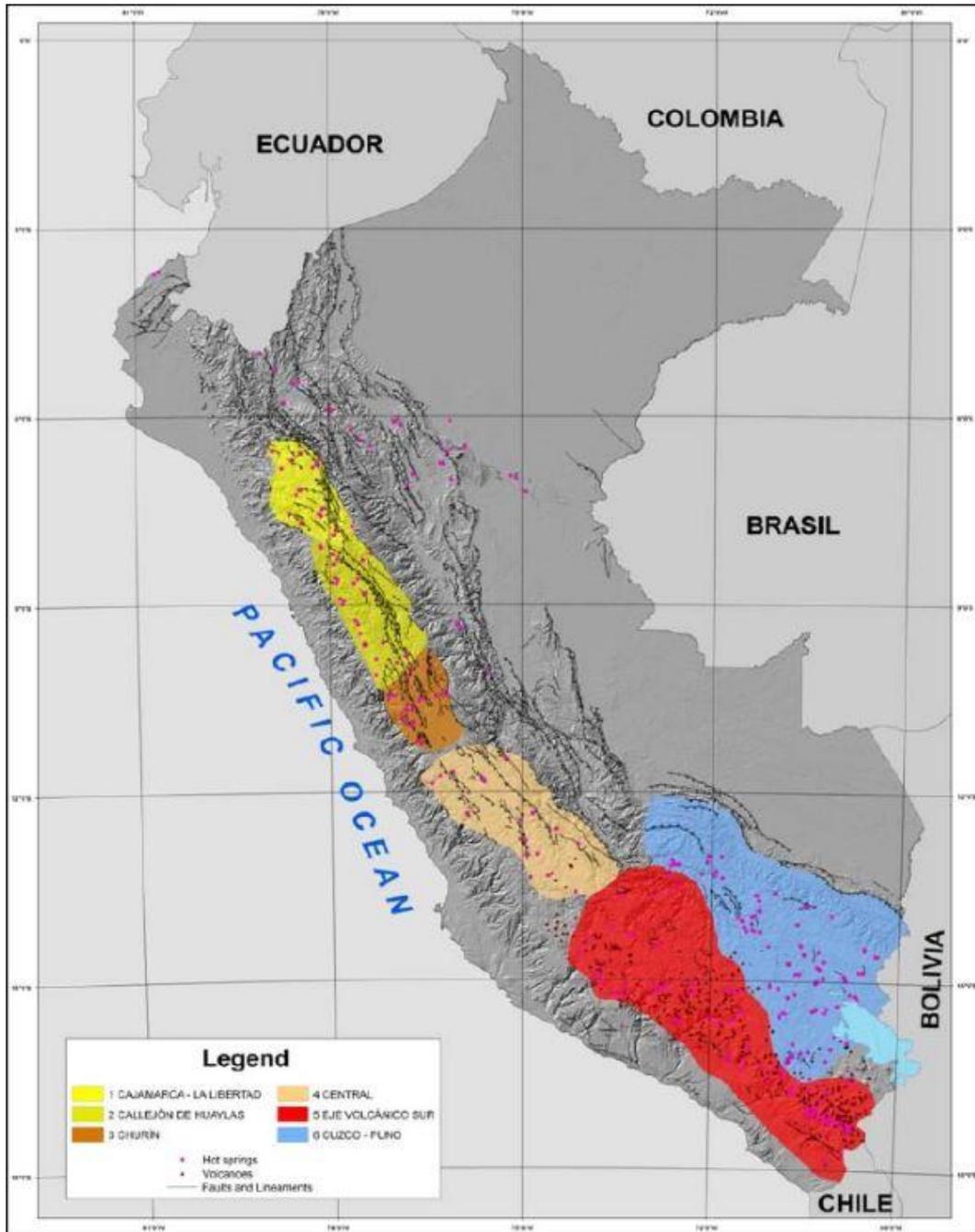


Figura 7. *Potencial Geotérmico en el Perú*

Fuente: (Díaz Huaina & Guadalupe Gómez, 2021)

2.2.7. Ciclo Rankine ideal

Se caracteriza por emplear generalmente agua como fluido de trabajo, en forma de vapor para aprovechar la energía contenida en su interior al pasar por una turbina de vapor y generar energía eléctrica. Para poder analizar este tipo de ciclo, es necesario realizar principios de conservación de la masa y energía, emplear el

segundo principio de la termodinámica y determinar las propiedades termodinámicas en cada estado.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar el esquema del Ciclo Rankine Ideal y su esquema termodinámico.

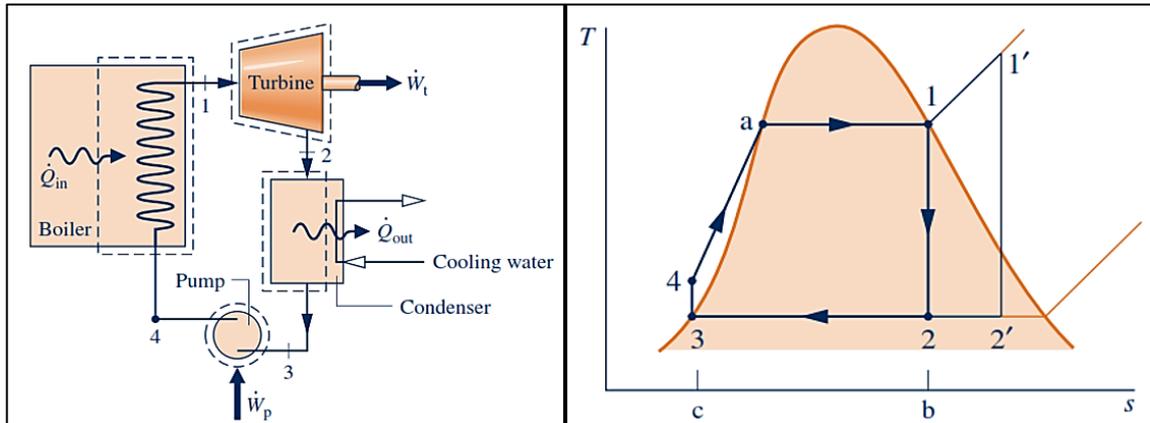


Figura 8. Esquema del Ciclo Rankine ideal y su diagrama termodinámico T-s

Fuente: (Moran et al., 2018)

2.2.8. Ciclo Rankine real

El Ciclo Rankine real difiere del ideal en que se emplean las eficiencias isentrópicas de la bomba, turbina, caldera o intercambiador de calor, pérdidas en tuberías, eficiencia del condensador, del generador, pérdidas por fricción. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver el diagrama termodinámico T-s para el Ciclo Rankine real.

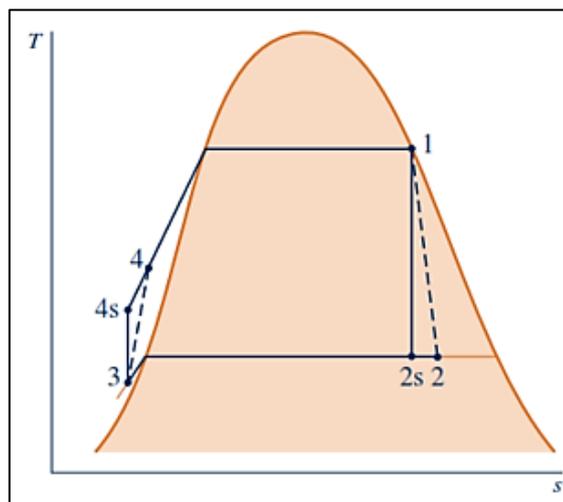


Figura 9. Diagrama termodinámico T-s del Ciclo Rankine real

Fuente: (Moran et al., 2018)

Los equipos y componentes empleados para el Ciclo Rankine se detallan a continuación:

Bomba

El líquido saturado que viene del condensador, es bombeado desde la presión dominante en el condensador hasta la presión más alta de la caldera.

Caldera

El fluido de trabajo proveniente de la bomba, llamado agua de alimentación, se le agrega calor y se calienta hasta saturarse y evaporarse en la caldera, obteniéndose vapor sobrecalentado.

Turbina

El vapor sobrecalentado que se obtuvo en la Caldera, con presión y temperatura alta, se expande al pasar dentro de la turbina, generando trabajo, luego se descarga al condensador a baja presión.

Condensador

Es un intercambiador de calor, donde su función es transferir calor del vapor extraído de la turbina al agua de refrigeración que circula en un flujo por separado. El vapor se condensa y aumenta la temperatura del agua de refrigeración.

Torre de enfriamiento

Encargado de suministrar el agua de refrigeración para el condensador, con el fin de reducir la temperatura del vapor proveniente a la salida de la turbina.

Generador

Es el equipo que se encarga de transformar la energía mecánica transferida por la turbina por medio de un eje, donde están acoplados, en energía eléctrica para ser inyectada al SEIN.

Tuberías

Son aquellos elementos que sirven para transportar el fluido de trabajo de un equipo a otro, deben ser capaces de soportar las presiones de trabajo empleadas.

Accesorios

Son aquellos que complementan el funcionamiento del Ciclo Rankine, como son las válvulas, codos, manómetros, caudalímetros, válvulas de seguridad, uniones universales, tuberías de fierro o acero, etcétera.

2.2.9. Ciclo Binario

Las centrales de producción de energía geotérmica de Ciclo Binario, en esencia es un Ciclo donde se emplean dos fluidos de trabajo, el fluido geotérmico que se extrae del campo geotérmico y el fluido orgánico de trabajo empleado en el Ciclo Rankine de potencia. Difieren de los sistemas de vapor seco y vapor flash en que el agua o vapor del yacimiento geotérmico nunca se pone en contacto con las unidades de turbina-generator.

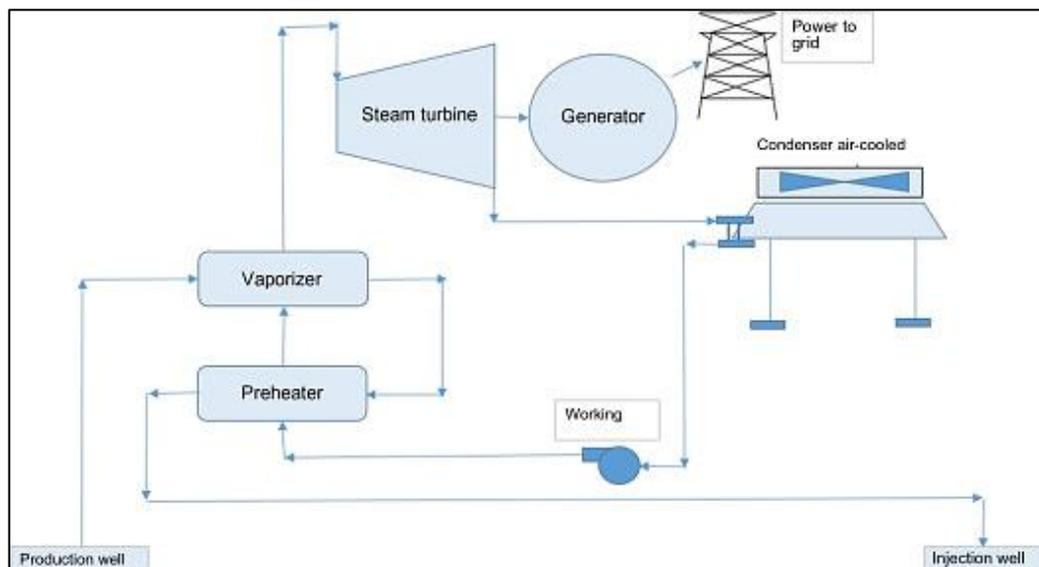


Figura 10. Esquema de un Ciclo Binario Rankine de potencia

Fuente: (Hernández Ochoa et al., 2021)

Intercambiador de calor

Para intercambiar calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y separados por una pared sólida, se da en muchas aplicaciones de la ingeniería. El nombre que recibe este dispositivo utilizado es Intercambiador de calor y puede ser de flujo paralelo, es decir, los fluidos entran por el mismo extremo y en la misma dirección; y de contraflujo si los fluidos entran por los extremos opuestos, fluyendo en direcciones opuestas. (Cengel & Ghajar, 2020)

2.2.10. Análisis de rentabilidad

El autor Vásquez & Arroyo (2016), menciona que es necesario para el análisis de rentabilidad emplear los parámetros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), tiempo de recuperación de la inversión (T_r) y la relación beneficio-costos.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Investigación aplicada: Se busca generar conocimiento con aplicación directa a los problemas suscitados en la sociedad o en el sector productivo, aplicando las teorías, fórmulas y experiencias de la ciencia de la ingeniería para obtener una solución al problema planteado. (Lozada, 2015)

Diseño no experimental: Del tipo explicativo, ya que se buscará dar respuesta a los objetivos planteados para luego explicar si los datos hallados son correctos y además detallar el funcionamiento de la central Geotermoeléctrica. Es decir, no se manipula de forma deliberada las variables. (Hernández et al, 2018)

3.2. Variables y operacionalización

Las variables son:

Independiente: Central Geotermoeléctrica

Dependiente: Campo Geotérmico Calacoa – Putina

3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis

La población serán todos los yacimientos geotérmicos a nivel nacional.

La muestra considerada será el yacimiento geotérmico de Calacoa-Putina ubicado en el departamento de Moquegua.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- Revisión bibliográfica

Este tipo de técnica permitirá investigar sobre las características de los yacimientos geotérmicos, sobre las centrales geotermoeléctricas y cómo realizar el análisis termodinámico y de rentabilidad, para lograrlo se hará una revisión y análisis en revistas indexadas, las cuales se pueden encontrar en Scopus y en Google Académico, considerando que éstas sean de alto impacto.

- Análisis documental

Para el desarrollo de este tipo de técnica, se buscará información en libros actualizados con alto contenido respecto al tema investigado, además de artículos de revistas, manuales, fichas técnicas, es decir, de fuentes secundarias de información. Para ello se empleará como instrumento de recolección de datos a la ficha de registro de datos, los mismos que no necesitan ser validados ya que los datos fueron recopilados en el pasado por otro investigador, lo cual da validez a dichos datos. En el informe final del Plan Maestro para el desarrollo de la energía geotérmica en el Perú realizado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), se puede encontrar información importante respecto a los yacimientos geotérmicos disponibles en el país y a su posible capacidad de producción de energía eléctrica, dicho documento servirá para poder llevar a cabo la siguiente investigación, conteniendo parámetros de partida útiles para un adecuado y correcto diseño de una central geotermoeléctrica en el yacimiento Calacoa-Putina. (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012)

3.5. Procedimientos

El procedimiento que se empleará es el detallado a continuación:

- a) Para empezar con el análisis termodinámico, es necesario saber que fluido orgánico de trabajo empleado en el Ciclo de potencia, para esto se hará un análisis comparativo de los diferentes fluidos disponibles en el mercado, para luego seleccionar el adecuado para optimizar el Ciclo de potencia.
- b) Se determinarán los parámetros operacionales para central geotermoeléctrica, es decir, las temperaturas de entrada y salida en la turbina, los límites de presión empleados para los equipos del ciclo de potencia empleado, la potencia a generar. Las temperaturas en la entrada y salida del intercambiador de calor.
- c) Posteriormente, se determinan los parámetros faltantes, los cuales se irán calculando empleando las tablas termodinámicas del fluido orgánico de trabajo seleccionado, si el dato a calcular no se encuentra a simple vista, se interpola este

dato, el cual debe encontrarse entre ciertos valores límites. Se hará uso del software MathCAD Prime 7 para procesar los datos, incluyendo las unidades.

d) Para corroborar los resultados obtenidos del software MathCAD Prime 7, se empleará el software Computer Aided Thermodynamic Tables 3, para realizar un análisis comparativo.

e) Para el análisis de rentabilidad, se utilizará el software Microsoft Excel para poder determinar los parámetros como el VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa interna de retorno), relación Beneficio-Costo y tiempo de recuperación de la inversión, con el fin de poder determinar si el proyecto es rentable durante el tiempo de vida de la Central Geotermoeléctrica.

f) Posteriormente, se realizó la discusión de resultados comparando los datos con los autores citados en los antecedentes de la investigación, para determinar la validez y corroborar que los datos obtenidos concuerdan con lo antes mencionado.

g) Finalmente, se procedió a realizar las conclusiones de acuerdo a los objetivos planteados y las sugerencias.

3.6. Método de análisis de datos

Los datos obtenidos de la presente investigación serán procesados de manera manual y a la vez utilizando programas de computadora como el MathCAD Prime 7 para determinar todos los parámetros necesarios, software de diseño termodinámico como TermoGraf para graficar los diagramas termodinámicos requeridos, el software Microsoft Excel para llevar a cabo el análisis de rentabilidad. Los datos de las propiedades termodinámicas de los fluidos orgánicos de trabajo se obtendrán de diferentes autores o bibliografías para poder llevar a cabo el análisis del Ciclo de potencia para la Central Geotermoeléctrica. Esta etapa es importante, ya que de aquí se obtendrán todos los datos necesarios para el correcto análisis de la central geotermoeléctrica, para las conclusiones y recomendaciones al finalizar.

3.7. Aspectos éticos

Los informes o investigaciones empleadas para el desarrollo del presente proyecto, no se alteraron, es decir, se tuvo en cuenta las normas para referenciar a los autores y material bibliográfico consultado. Además, considerando la guía del asesor para que el proyecto sea lo más exacto posible a la realidad y evitando cualquier tipo de plagio o copia, buscando la originalidad del mismo. Adicionalmente, se contará con un asesor externo con conocimiento respecto al tema investigado, quien con su apoyo brinda información importante para el desarrollo de la presente investigación.

IV. RESULTADOS

4.1. Selección del fluido orgánico de trabajo

La central geotermoeléctrica funcionará empleando un Ciclo Rankine Binario de Potencia, para lo cual es necesario seleccionar el adecuado fluido orgánico de trabajo para dicho ciclo, con el objetivo de que se pueda optimizar al emplear el mejor fluido orgánico de trabajo.

Para dichas centrales se emplean los siguientes fluidos orgánicos de trabajo:

- Isobutano (R600a).
- Isopentano (R601a).
- Tetrafluoroetano (R134a).
- Fluido frigorígeno (R410a).
- Diclorofluorometano (R12).

Al realizar un análisis, se pudo determinar que el Isopentano y el Isobutano son alcanos o combustibles, siendo inflamables y peligrosos, lo que contribuiría al aumento del efecto invernadero. Luego, el R410a y el R134a son refrigerantes empleados ampliamente en sistemas de refrigeración y acondicionamiento de aire, ya que poseen características y propiedades termodinámicas excelentes para tales fines, pero el que más destaca es el R410a, porque posee un punto de ebullición de -52.1°C a una presión atmosférica de 101.3 kPa; en tanto que el R134a es de -26°C , incluyendo que posee un mejor poder de vaporización de todos los fluidos orgánicos de trabajos presentados para el análisis comparativo.

La Tabla 1 muestra una comparación entre los fluidos de trabajo descritos.

Al realizar un análisis comparativo de los fluidos de trabajo R12, R134a, R410a, R600a y R601a, se llega a la conclusión que el más adecuado es el R410a por no ser inflamable, ser ecoamigable, alto calor de vaporización, no tóxico, clasificación ASHRAE A1, bajo punto de ebullición y además de que su precio en el mercado es realmente similar al de los demás fluidos.

Entonces, el fluido orgánico de trabajo seleccionado es el refrigerante R410a, con esto, se necesitará la tabla termodinámica para dicho refrigerante, la misma se puede apreciar en el Anexo 2 (Borgnakke & Sonntag, 2019).

Tabla 1. Cuadro comparativo para seleccionar el fluido orgánico de trabajo adecuado para el ciclo binario

Característica	Fluido Orgánico				
	R12	R134a	R410a	R600a	R601a
Denominación química	Diclorofluorometano	Tetrafluoroetano	Tetrafluoroetano + Pentafluoroetano	Isobutano	Isopentano
Fórmula	CCl_2F_2	$CH_2F - CF_3$	$50\%CHF_2 - CF_3 + 50\%CH_2F - CF_3$	C_4H_{10}	C_5H_{12}
Punto de ebullición a presión atmosférica (°C)	-29.8	-26.3	-52.1	-11.7	27.8
Inflamabilidad	No	No	No	Si	Si
Ecoamigable	Si	Si	Si	Si	Si
Calor de Vaporización (kJ/kg)	152.42	197.44	271.5	332	-
Toxicidad	No (Anestésico)	No	No	No	No
Clasificación ASHRAE	A1	A1	A1	A3	A3

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Para realizar una evaluación adecuada, se elaborará una matriz de ponderación para determinar el mejor fluido orgánico de trabajo a ser empleado en el ciclo Rankine orgánico de potencia para la central geotermoeléctrica propuesta. Para dicho análisis, se consideró la Tabla 2 donde se puede apreciar los niveles de ponderación adecuados.

Tabla 2. *Ratios para análisis de matriz de ponderación*

RATIO	VALOR
Insatisfactorio – caro	1
Tolerable – relativamente caro	2
Adecuado – precio estandar	3
Bueno – relativamente barato	4
Muy bueno – barato	5

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 3. *Criterios a considerar para evaluación de matriz de ponderación*

PARAMETROS	CRITERIO
Grado de contaminación	Este criterio servirá para medir el grado de contaminación que posee cada fluido orgánico de trabajo.
Poder calorífico	Este criterio indicará el poder calorífico que posee cada fluido orgánico de trabajo.
Costo	Este criterio medirá el nivel del costo que tiene cada fluido orgánico de trabajo.
Toxicidad	Este criterio servirá para medir el nivel de toxicidad de cada fluido orgánico de trabajo.
Inflamabilidad	Este criterio servirá para poder medir la inflamabilidad que posee cada fluido orgánico de trabajo.

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 4. *Matriz de ponderación para escoger la mejor alternativa*

Fluido orgánico de trabajo	Criterios de selección										Total
	Grado de contaminación		Poder calorífico		Costo		Toxicidad		Inflamabilidad		
	25%		20%		30%		10%		15%		
R12	4	1.0	2	0.4	5	1.5	3	0.3	3	0.45	3.65
R134a	4	1.0	3	0.6	3	0.9	5	0.5	3	0.45	3.45
R410a	4	1.0	4	0.8	3	0.9	5	0.5	4	0.60	3.80
R600a	3	0.75	5	1.0	4	1.2	5	0.5	1	0.15	3.60
R601a	3	0.75	5	1.0	4	1.2	5	0.5	1	0.15	3.60

Fuente: Elaboración propia de los autores.

De la Tabla 4 se puede deducir que el refrigerante R410a es el más adecuado para ser considerado como el fluido orgánico de trabajo para el ciclo descrito.

4.2. Parámetros para análisis termodinámico de la geotermoeléctrica

Los parámetros que se requieren y que pueden ser configurados de acuerdo a la selección del equipamiento, de forma aproximada son:

$$T_1 = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_4 = 40 \text{ bar}$$

Para la central geotermoeléctrica propuesta se considerará una potencia para generación de 100 MW, de la Tabla 5, datos recopilados por JICA (2012), de donde se puede verificar que el campo geotérmico de Calacoa-Putina tiene una capacidad de posible desarrollo de 100 MWe.

Tabla 5. Especificaciones principales para el desarrollo de la producción de energía eléctrica en los campos geotérmicos potenciales

Nombre del campo	Potencial de Recursos P80 (MWe)	Capacidad posible de desarrollo (MWe)
Chungara-Kallapuma	84,0	75
Ancocollo	98,2	90
Tutupaca	113,8	105
Crucero	79,4	70
Pinaya	36,8	35
Calacoa-Putina	108,2	100
Ulucan	27,4	25
Jesus Maria	17,3	10
Ccollo/Titire	39,7	35
Cailloma	9,1	5
Chivay - Pinchollo	162,9	150
Puquio	34,3	30
Chancos	15,3	5
Total	826,4	735

Fuente: (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012)

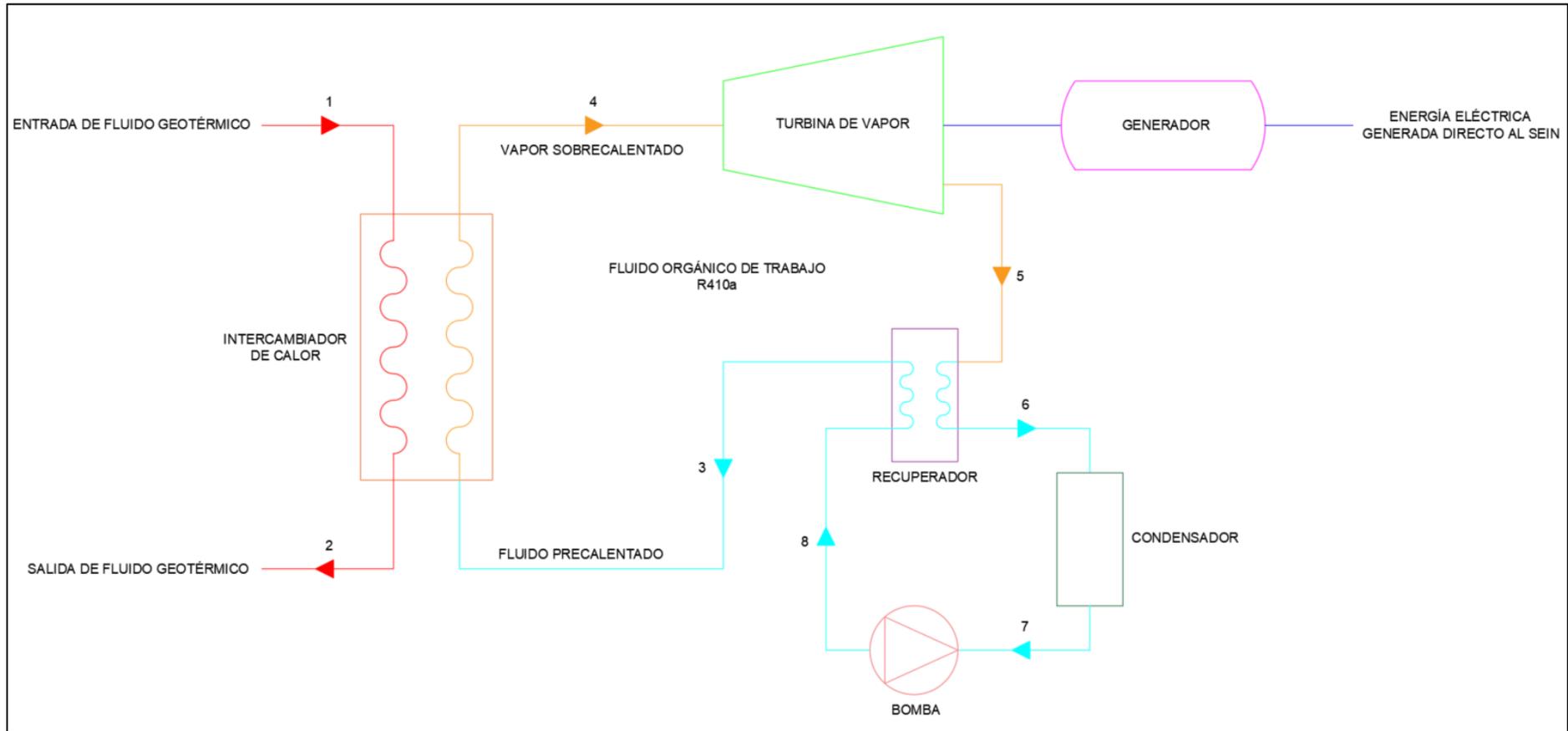


Figura 11. Configuración termodinámica del equipamiento para la central geotérmica

Fuente: Elaborado con AutoCAD 2021.

Análisis termodinámico

Estado 7: a partir de este estado, el fluido de trabajo es R410a, el cual es líquido saturado, empleando tablas, se obtienen los parámetros restantes.

$$P_7 = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

Tabla 6. Parámetros para determinar la temperatura en el estado 7

T(°C)	P(kPa)
-55	84
T_7	100
-51.4	101.3

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$T_{7a} = -55 \text{ °C}$$

$$P_{7a} = 84 \text{ kPa}$$

$$T_{7c} = -51.4 \text{ °C}$$

$$P_{7b} = P_7 = 100 \text{ kPa}$$

$$P_{7c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$T_7 = T_{7a} + (T_{7c} - T_{7a}) \cdot \left(\frac{P_{7b} - P_{7a}}{P_{7c} - P_{7a}} \right) = -51.67 \text{ °C}$$

Tabla 7. Parámetros para determinar la entropía en el estado 7

s (kJ/kg. K)	P(kPa)
-0.0912	84
S_7	100
-0.0688	101.3

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$s_{7a} = -0.0912 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$P_{7a} = 84 \text{ kPa}$$

$$s_{7c} = -0.0688 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$P_{7b} = P_7 = 100 \text{ kPa}$$

$$P_{7c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$s_7 = s_{7a} + (s_{7c} - s_{7a}) \cdot \left(\frac{P_{7b} - P_{7a}}{P_{7c} - P_{7a}} \right) = -0.0705 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

Tabla 8. Parámetros para determinar la entalpía en el estado 7

h (kJ/kg)	P(kPa)
-20.64	84
h_7	100
-15.70	101.3

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$h_{7a} = -20.64 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{7a} = 84 \text{ kPa}$$

$$h_{7c} = -15.10 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{7b} = P_7 = 100 \text{ kPa}$$

$$P_{7c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$h_7 = h_{7a} + (h_{7c} - h_{7a}) \cdot \left(\frac{P_{7b} - P_{7a}}{P_{7c} - P_{7a}} \right) = -16.0712 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 9. Parámetros para determinar el volumen específico en el estado 7

v (m³/kg)	P (kPa)
0.000735	84
v_7	100
0.000741	101.3

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$v_{7a} = 0.000735 \frac{m^3}{kg}$$

$$P_{7a} = 84 \text{ kPa}$$

$$v_{7c} = 0.000741 \frac{m^3}{kg}$$

$$P_{7b} = P_7 = 100 \text{ kPa}$$

$$P_{7c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$v_7 = v_{7a} + (v_{7c} - v_{7a}) \cdot \left(\frac{P_{7b} - P_{7a}}{P_{7c} - P_{7a}} \right) = 0.000740549 \frac{m^3}{kg}$$

Estado 8: se tiene la bomba, empleando la fórmula se calcula la entalpía en este punto:

$$P_8 = 4 \text{ MPa}$$

$$w_{bomba.entrada} = v_7 \cdot (P_8 - P_7) = 2.8881 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_8 = h_7 + w_{bomba.entrada} = -13.183 \frac{kJ}{kg}$$

Para calcular la temperatura en este estado, se emplea la entalpía y se calcula la temperatura como si estuviera en estado de saturación, es decir, como líquido saturado.

Tabla 10. Parámetros para determinar la temperatura en el estado 8

h (kJ/kg)	T (°C)
-13.80	-50
-13.183	T_8
-6.92	-45

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$T_{8a} = -50^{\circ}\text{C}$$

$$h_{8a} = -13.80 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{8c} = -45^{\circ}\text{C}$$

$$h_{8b} = h_8 = -13.183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{8c} = -6.92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_8 = T_{8a} + (T_{8c} - T_{8a}) \cdot \left(\frac{h_{8b} - h_{8a}}{h_{8c} - h_{8a}} \right) = -49.55^{\circ}\text{C}$$

Estado 3: se tiene líquido saturado a la presión de 4 MPa, a la entrada del intercambiador de calor.

$$P_3 = P_8 = 4000 \text{ kPa}$$

$$T_3 = 61.90^{\circ}\text{C}$$

$$h_3 = 268.76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_3 = 0.0046 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$s_3 = 0.8782 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Estado 4: Para la presión y temperatura especificadas, se puede decir que se tiene vapor sobrecalentado a la salida del intercambiador de calor.

$$P_4 = P_8 = 4000 \text{ kPa}$$

$$T_4 = 140^{\circ}\text{C}$$

$$h_4 = 391.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_4 = 0.0099 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$s_4 = 1.2136 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Estado 5: Para la presión y temperatura especificadas, se puede decir que se tiene vapor sobrecalentado a la salida de la turbina de vapor.

$$P_5 = P_7 = 100 \text{ kPa}$$

$$T_5 = 80^{\circ}\text{C}$$

$$h_5 = 364.92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_5 = 0.40171 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$s_4 = 1.5425 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Realizando un balance de masa y energía en el recuperador, se tiene lo siguiente:

$$Q_{fluido.caliente} = Q_{fluido.frio}$$

$$m_{R410} \cdot C_{R410} \cdot (T_6 - T_5) = m_{R410} \cdot C_{R410} \cdot (T_8 - T_3)$$

Despejando:

$$T_6 = (T_8 - T_3) + T_5$$

$$T_6 = -31.452^\circ C$$

Para que el ciclo sea lo más real posible, se emplearon las eficiencias isentrópicas de la turbina y bomba.

$$\eta_{turbina} = 90\% = 0.9$$

$$\eta_{bomba} = 85\% = 0.85$$

$$w_{bomba.r} = \frac{w_{bomba.entrada}}{\eta_{bomba}} = 3.398 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{8r} = h_7 + w_{bomba.r} = -12.673 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 11. Parámetros para determinar la temperatura real en el estado 8

h (kJ/kg)	T (°C)
-13.80	-50
-12.673	T_{8r}
-6.92	-45

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$T_{8a} = -50^\circ C$$

$$h_{8a} = -13.80 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_{8c} = -45^\circ C$$

$$h_{8b} = h_{8r} = -12.6734 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{8c} = -6.92 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_{8r} = T_{8a} + (T_{8c} - T_{8a}) \cdot \left(\frac{h_{8b} - h_{8a}}{h_{8c} - h_{8a}} \right) = -49.18^\circ C$$

$$w_{turbina.i} = h_4 - h_5 = 26.83 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{5r} = h_4 - \eta_{turbina} \cdot w_{turbina.i} = 367.603 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 12. Parámetros para calcular la temperatura real en el estado 5

h (kJ/kg)	T (°C)
364.92	80
367.603	T_{5r}
383.17	100

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$T_{5ar} = 80^{\circ}C \quad h_{5ar} = 364.92 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_{5cr} = 100^{\circ}C \quad h_{5br} = h_{5r} = 367.603 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{5cr} = 383.17 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_{5r} = T_{5ar} + (T_{5cr} - T_{5ar}) \cdot \left(\frac{h_{5br} - h_{5ar}}{h_{5cr} - h_{5ar}} \right) = 82.94^{\circ}C$$

Tabla 13. Parámetros para determinar la entropía real en el estado 5

s (kJ/kg. K)	h (kJ/Kg)
1.5425	364.92
S_{5r}	367.603
1.5928	383.17

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$S_{5ar} = 1.5425 \frac{kJ}{kg.K} \quad h_{5ar} = 364.92 \frac{kJ}{kg}$$

$$S_{5cr} = 1.5928 \frac{kJ}{kg.K} \quad h_{5br} = h_{5r} = 367.603 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{5cr} = 383.17 \frac{kJ}{kg}$$

$$S_{5r} = S_{5ar} + (S_{5cr} - S_{5ar}) \cdot \left(\frac{h_{5br} - h_{5ar}}{h_{5cr} - h_{5ar}} \right) = 1.5499 \frac{kJ}{kg.K}$$

De forma ideal:

$$w_{turbina.i} = h_4 - h_5 = 26.83 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{bomba.i} = h_8 - h_7 = 2.888 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{neto.ideal} = w_{turbina.i} - w_{bomba.i} = 23.942 \frac{kJ}{kg}$$

El calor de entrada será:

$$q_{entrada} = h_4 - h_5 = 122.99 \frac{kJ}{kg}$$

La eficiencia ideal del Ciclo Binario Rankine de potencia es:

$$\eta_{térmica.i} = \frac{W_{neto.ideal}}{q_{entrada}} = 0.1947$$

Ahora, calculando la eficiencia térmica real del ciclo binario:

$$w_{turbina.r} = h_4 - h_5 = 24.147 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{bomba.r} = h_8 - h_7 = 3.398 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{neto.r} = w_{turbina.r} - w_{bomba.r} = 20.749 \frac{kJ}{kg}$$

Eficiencia térmica real entonces será:

$$\eta_{térmica.real} = \frac{W_{neto.real}}{q_{entrada}} = 0.1687$$

La potencia de la turbina es de 100 MW, con este dato se calcula el flujo másico del fluido orgánico de trabajo.

$$W_{turb} = 100 \text{ MW} \quad \dot{m}_{cb} = \frac{W_{turb}}{w_{neto.r}} = 4819.466 \frac{kg}{s}$$

Cálculo para intercambiador de calor:

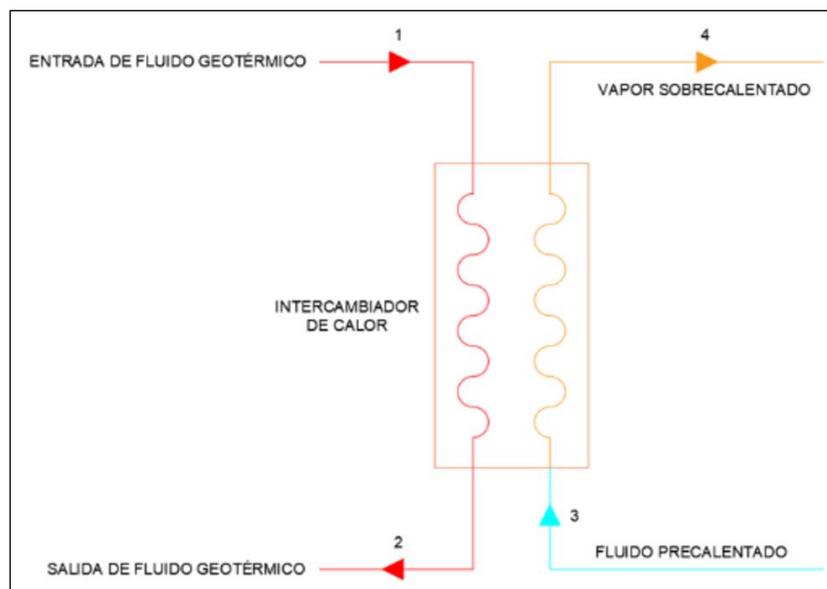


Figura 12. Esquema con parámetros para intercambiador de calor

Fuente: Elaborado con AutoCAD 2019.

Los datos para poder dimensionar el intercambiador de calor son:

$$T_3 = 61.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p.fcb} = 1.335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$C_{p.agua} = 4.311 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$\dot{m}_{cb} = 4819.466 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Calculando el calor requerido:

$$Q_{requerido} = \dot{m}_{cb} \cdot C_{p.fcb} \cdot (T_4 - T_3) = 502494.403 \text{ kW}$$

El flujo de masa del fluido geotérmico será:

$$\dot{m}_{fluido.geot\acute{e}rmico} = \frac{Q_{requerido}}{C_{p.agua} \cdot (T_1 - T_2)} = 1165.61 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{fluido.geot\acute{e}rmico} = 4196195.433 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\rho_{fluido.geot\acute{e}rmico} = 915.35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{V}_{fluido.geot\acute{e}rmico} = 4584.252 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Cálculo de tuberías:

Datos:

$$\dot{m}_{unit.fg} = 200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$N_{pozos} = \frac{\dot{m}_{fluido.geot\acute{e}rmico}}{\dot{m}_{unit.fg}}$$

$$N_{pozos} = \frac{1165.61 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 5.828$$

$$N_{pozos.real} = 6$$

Entonces son necesarios 6 pozos para producción de flujo geotérmico.

$$\dot{m}_{fg.unitario} = \frac{\dot{m}_{fluido.geot\acute{e}rmico}}{N_{pozos.real}}$$

$$\dot{m}_{fg.unitario} = 194.268 \frac{kg}{s}$$

$$h = 1250 \frac{kJ}{kg} \qquad P_c = 40 \text{ bar}$$

$$k = 183900$$

Empleando la fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_{fg.unitario} \cdot h^{1.102}}{k \cdot \pi \cdot P_c^{0.96}}}$$

$$D = 0.318 \text{ m}$$

$$D \cong 12.501 \text{ pulgadas}$$

Es decir, se seleccionó una tubería de 14 pulgadas, el valor inmediato superior de acuerdo con el Anexo 8.

Toda la información detallada anteriormente, se resumirá en la Tabla 22 para una mejor comprensión de los resultados.

Para corroborar que los datos obtenidos son los correctos, se empleará un software llamado *Computer Aided Thermodynamic Tables 3*, el cual servirá para calcular las propiedades termodinámicas en cada estado, considerando 2 propiedades termodinámicas especificadas para dicho estado. En la Tabla 15 se aprecia la información obtenida de dicho software.

Tabla 14. Resumen del Ciclo Rankine Orgánico de potencia

Estado	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/g. °C)	v (m³/kg)	\dot{m} (kg/s)	Calidad (x)	Fase	Fluido de trabajo
1	0.6178	160.00	2758.00	6.75	0.3071	1942.683	1	Vapor saturado	Agua
2	0.6178	100.00	419.40	1.306	0.001043	1942.683	0	Líquido saturado	Agua
3	4.00	61.90	268.76	0.8782	0.0046	4819.466	0	Líquido saturado	R410a
4	4.00	140.00	391.75	1.2136	0.0099	4819.466	-	Vapor sobrecalentado	R410a
5	0.10	80.00	364.92	1.5425	0.40171	4819.466	-	Vapor sobrecalentado	R410a
6	0.10	-31.452	272.80	1.231	0.02686	4819.466	-	Vapor sobrecalentado	R410a
7	0.10	-51.67	-16.0712	-0.0705	0.000740549	4819.466	0	Líquido saturado	R410a
8	4.00	-49.55	-11.79	-0.06419	0.0007392	4819.466	0	Líquido saturado	R410a

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 15. Resumen del Ciclo Rankine Orgánico de potencia con software Computer Aided Thermodynamic Tables 3

Estado	P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/g. °C)	v (m³/kg)	\dot{m} (kg/s)	Calidad (x)	Fase	Fluido de trabajo
1	0.6178	160.00	2758.00	6.75	0.3071	1942.683	1	Vapor saturado	Agua
2	0.6178	100.00	419.40	1.306	0.001043	1942.683	0	Líquido saturado	Agua
3	4.00	61.90	268.7	0.8781	0.004596	4819.466	0	Líquido saturado	R410a
4	4.00	140.00	391.8	1.214	0.009903	4819.466	-	Vapor sobrecalentado	R410a
5	0.10	80.00	364.9	1.543	0.4017	4819.466	-	Vapor sobrecalentado	R410a
6	0.10	-31.452	272.80	1.231	0.2686	4819.466	-	Vapor sobrecalentado	R410a
7	0.10	-51.67	-16.09	-0.07054	0.0007406	4819.466	0	Líquido saturado	R410a
8	4.00	-45.00	-13.183	-	-	4819.466	0	Líquido saturado	R410a

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Al realizar un análisis, se puede apreciar que la variación obtenida para las propiedades termodinámicas tanto con el software MathCAD Prime 7 con las tablas termodinámicas del Anexo 1 como con el software Computer Aided Thermodynamic Tables 3 son similares, la variación es insignificante, demostrando lo confiables y potentes de dichos softwares al momento de ser utilizados.

4.3. Selección del equipamiento de la central geotermoeléctrica

Turbina de vapor

La turbina debe tener la capacidad de producir la potencia requerida, la misma que es de 100 MW, se selecciona esta capacidad ya que el yacimiento geotérmico posee una capacidad de producir más de 100 MW, pero solo se dimensionará de 100 MW.

La turbina seleccionada será una Siemens SST-500 de 100 MW de potencia, la ficha técnica se puede apreciar en el Anexo 3.

Generador

Para el generador, se empleará la potencia de la turbina para dimensionar la potencia aparente del generador, considerando un factor de potencia de 0.85, se obtiene una potencia aparente de:

$$Potencia\ aparente = \frac{P_{neta}}{factor\ de\ potencia}$$

$$Potencia\ aparente = \frac{100\ MW}{0.85}$$

$$Potencia\ aparente = 117.65\ MVA$$

Se debe seleccionar un generador de 117.65 MVA, entonces se escoge un generador con el valor inmediato superior, pero considerando de no fatigarlo a su máxima capacidad de trabajo, por lo tanto, si el generador opera a una capacidad del 85%, se obtiene una potencia aparente de:

$$Potencia\ real = \frac{Potencia\ aparente}{factor\ de\ servicio}$$

$$Potencia\ real = \frac{117.65\ MVA}{0.85}$$

$$Potencia\ real = 138.41\ MVA$$

Se selecciona un generador Siemens SGen6-100A-2P de 140 MVA, la ficha técnica se aprecia en el Anexo 4.

Intercambiador de calor

El intercambiador de calor debe tener una capacidad igual o superior a 4584.252 m³/h, para poder trabajar de acuerdo a lo requerido en la Central Geotérmica, con una temperatura máxima de trabajo igual o superior a 160 °C y una temperatura mínima de trabajo igual o superior a -52 °C.

Para ello se selecciona el intercambiador de calor Alfa Laval CP150, con una capacidad máxima de 6000 m³/h. En el Anexo 5 se puede visualizar la ficha técnica.

Bomba de alimentación

La bomba de alimentación debe tener una capacidad de:

$$\dot{W}_{bomba} = 3.398 \frac{kJ}{kg} * 4819.466 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{W}_{bomba} = 16376.545\ kW$$

$$\dot{W}_{bomba} = 21961.3086\ hp$$

En el mercado, no existe una sola bomba con dicha capacidad por lo que se seleccionarán varias bombas, en el mercado se tienen bombas con una capacidad máxima de 2800 hp, por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$N_{bombas} = \frac{21961.3086\ hp}{2800\ hp} = 8$$

Por lo que serán necesarias 8 bombas de 2800 hp para lograr conseguir la potencia total para suministrar y bombear el flujo másico del ciclo Rankine de potencia para generar la potencia solicitada. La ficha técnica se puede apreciar en el Anexo 6.

Tuberías

El diámetro de la tubería para extraer el fluido geotérmico debe ser de 14 pulgadas, contando con 6 pozos de producción. En el Anexo 7 se aprecia la ficha técnica para las tuberías.

4.4. Análisis económico financiero

Para poder evaluar económica y financieramente una central geotermoeléctrica, se debe tener en cuenta la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, con vigencia actual en el Perú, donde incluye los siguientes ítems:

Costos

- Subproyectos: Permisos, caminos de acceso, estudios de impacto ambiental, concesiones, indemnizaciones, difusión del proyecto y apoyo a la comunidad.
- Exploración de la zona (por lo general son 2 pozos profundos por cada área de exploración).
- Equipamiento de los vaporductos y pozos.
- Construcción de la central de generación.
- Construcción de líneas de transmisión y subestación.
- Costos de operación y mantenimiento del campo geotérmico y de la central.
- Costos en peajes que se asocian al sistema de transmisión.

Ingresos

- Por concepto de ventas de energía en el mercado, clientes libres y clientes regulados.
- Por concepto de potencia y por eventuales servicios complementarios.
- Por concepto de contratos bilaterales físicos.
- Por concepto de subsidios o franquicias asociadas a fomentos del desarrollo de las energías renovables.

Criterios a considerar para el análisis

Para poder realizar la evaluación económica, se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Para lograr un análisis adecuado, se ha considerado escenarios futuros del tipo conservador. Se realiza un análisis para un escenario de despacho base y despacho en media punta.
- El tiempo de vida del proyecto se estima en 20 años, horizonte de evaluación considerado para realizar el análisis.
- Los peajes de transmisión para el caso base, se ha considerado un pago estimado del 50% por parte de la central y un 50% por parte de los clientes o consumidores.
- Para poder determinar la rentabilidad del proyecto, se han empleado los indicadores de rentabilidad, como el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), y el tiempo de recuperación de la inversión. Para ambos casos de despacho se ha empleado una tasa de descuento del 12%.
- Los montos calculados estarán en dólares.

Descripción de la Inversión, Costos e Ingresos

Se requiere de ciertos modelos que permitan establecer aquellos costos de inversión, costos asociados al funcionamiento y de los ingresos generados de la venta de energía producida en el mercado nacional. En cada uno de los puntos, en lo que amerite, se especificarán características particulares:

A. Inversión

Se ha evaluado de acuerdo a lo observado y analizado a nivel internacional, a ciertas características particulares de aplicación al caso estudiado en el presente informe, teniendo en cuenta los siguientes puntos:

a. Exploración

Formado por los Estudios Geológicos, geofísicos, geoquímicos y otros. Se resume en la siguiente tabla:

Tabla 16. Costos por concepto de exploración

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Estudio Geológico	6 und	\$ 100 000.00	\$ 600 000.00
Estudio Geoquímico	6 und	\$ 60 000.00	\$ 360 000.00
Estudio Geofísico	6 und	\$ 200 000.00	\$ 1 200 000.00
Estudios Menores	1 und	\$ 200 000.00	\$ 200 000.00
Perforación de pozos exploratorios	6 und	\$ 1 000 000.00	\$ 6 000 000.00
Subtotal			\$ 8 260 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

b. Construcción de pozos y vaporductos

Los costos de inversión para este ítem se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 17. Costos por Construcción de pozos y vaporductos

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Perforación de pozos productores	7 und	\$ 1 800 000.00	\$ 12 600 000.00
Equipamiento de los pozos	1 glb	\$ 1 600 000.00	\$ 1 600 000.00
Vaporductos	6 und	\$ 600 000.00	\$ 3 600 000.00
Acueductos	1 und	\$ 200 000.00	\$ 200 000.00
Subtotal			\$ 18 000 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

c. Planta de Generación Eléctrica

Para este ítem, se tiene los siguientes costos de inversión:

Tabla 18. Costos para la Planta de Generación Eléctrica

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Maquinaria	1 und	\$ 54 000 000.00	\$ 54 000 000.00
Obras Civiles	1 und	\$ 4 000 000.00	\$ 4 000 000.00
Montaje e Instalación	1 und	\$ 4 000 000.00	\$ 4 000 000.00
Subestación y Transformador	1 und	\$ 2 000 000.00	\$ 2 000 000.00
Subtotal			\$ 64 000 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

d. Transmisión

En la transmisión se debe considerar la distancia desde la subestación a la cual se conectará la Central Geotermoeléctrica, en este caso, la subestación adecuada es Moquegua, ubicada a unos 63.50 km, es decir, $63.50 \text{ km} \times 2$ es igual a 127 km, el factor considerado es debido a la geografía del lugar, para la línea de transmisión (Ver Figura 13).

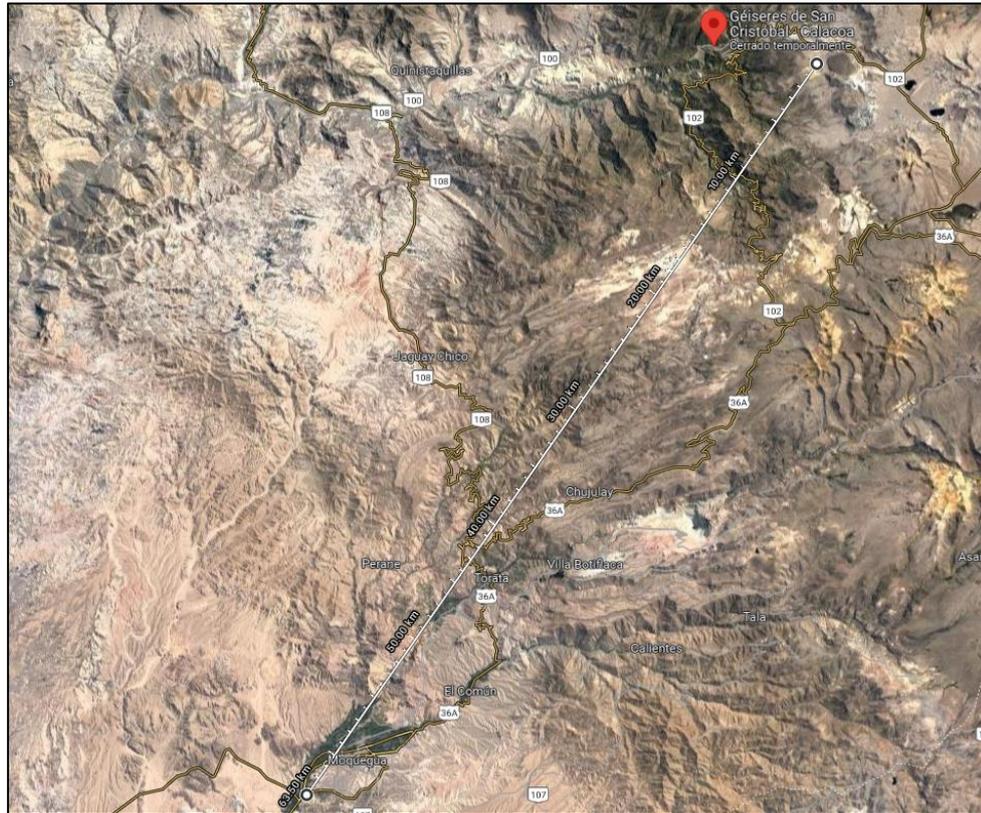


Figura 13. Distancia de la Central Geotérmica a la Subestación Moquegua

Fuente: Google Earth Pro.

En la Tabla 19 se precisa la información referente a los costos por concepto de transmisión.

Tabla 19. Costos por Transmisión

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Línea de transmisión	1 und	\$ 12 7000 000.00	\$ 12 700 000.00
Subtotal			\$ 12 700 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

e. Subproyectos

Para este apartado, se considera los caminos de acceso que se deben arreglar para poder trasladarse a la central, al estudio de impacto ambiental y las indemnizaciones. Se resume en la Tabla 20.

Tabla 20. *Costos por concepto de Subproyectos*

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Caminos de Acceso	1 und	\$ 400 000.00	\$ 400 000.00
Estudio de Impacto Ambiental	1 und	\$ 1 500 000.00	\$ 1 500 000.00
Indemnizaciones	1 und	\$ 0.00	\$ 0.00
Subtotal			\$ 1 900 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Resumen de la inversión total del proyecto, se presenta en la Tabla 21:

Tabla 21. *Resumen de los Costos de Inversión*

Descripción	Subtotal
Exploración	\$ 8 260 000.00
Construcción de pozos y vaporductos	\$ 18 000 000.00
Planta de Generación Eléctrica	\$ 64 000 000.00
Transmisión	\$ 12 700 000.00
Subproyectos	\$ 1 900 000.00
Inversión Total	\$ 104 860 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

El costo por kW de la central geotermoeléctrica asciende a \$ 1 048.60.

B. Costos de funcionamiento

a. Operación y Mantenimiento (O&M)

Los costos se han evaluado teniendo en cuenta a la estructura disponible a nivel internacional y a características particulares de su aplicación al caso en estudio. Se consideran los siguientes criterios:

- Personal: Para lograr operar una central de 100 MW, es necesario contar con 12 personas y para su operación y mantenimiento del campo geotérmico otras 24 personas.
- Mantenimiento: Este costo equivale al 1.5% de la inversión obtenida en pozos y vaporductos con los de planta eléctrica.
- Administración y gastos generales: Representan al 20% de los gastos relativos al personal y mantenimiento.
- Seguros e impuestos: Su valor representa el 1.2% de la inversión de pozos y vaporductos además de la planta eléctrica.

Tabla 22. Costos para Operación & Mantenimiento

Costos de Operación y Mantenimiento		
Descripción	Fracción	Costo Total
Personal de operación	-	\$ 600 000.00
Mantenimiento	1.50%	\$ 1 230 000.00
Administración y Gastos Generales	20.00%	\$ 366 000.00
Seguros e Impuestos	1.20%	\$ 984 000.00
Subtotal		\$ 3 180 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

b. Permisos

- Concesión de Explotación: De acuerdo al numeral 2.1 del Artículo 2° de la Ley N° 27435 de la Ley de Concesiones Eléctricas dispone que “En el caso de concesiones definitivas de generación, el monto de la garantía asciende al 1% del presupuesto del proyecto con un tope de 50 UIT (1 UIT equivale a \$ 1 100.00), entendiéndose su vigencia hasta la suscripción del correspondiente contrato de concesión”. Entonces, esto tiene un costo aproximado de \$ 55 000.00 anualmente.
- Peajes de transmisión: El costo para este ítem asciende a \$ 150 000.00 anuales.

Los costos de los permisos se resumen a continuación:

Tabla 23. Costos en Permisos

Costos en Permisos	
Descripción	Costo Total
Concesión de Explotación	\$ 55 000.00
Peajes de transmisión	\$ 150 000.00
Permisos para Centrales Geotérmicas	\$ 100 000.00
Subtotal	\$ 305 000.00

Fuente: Elaboración propia de los autores.

C. Ingresos

a. Por concepto de venta de energía

Para poder saber el precio para la venta de energía que genera la central geotérmica en estudio, se buscan los precios en barra en la subestación a la que alimentará, el cual es determinado por la Gerencia Adjunta de Regulación

Tarifaria (GART). Tomando al tipo de cambio del dólar en S/. 3.66 por dólar. Los precios en horas punta (PEMP) es de \$ 0.07262 y fuera de punta (PEMF) de \$0.05923. Se consideran constantes durante todo el período de análisis. Estos precios son los considerados en la subestación más cercana a la central geotérmica, la cual es la subestación Moquegua.

A. Despacho en Base

La potencia de generación de la central será de 100 MW, considerando un factor de planta de 0.9, además de 5 horas en punta y 19 horas fuera de punta. Se tiene una energía producida de 788 400 000.00 kWh en total, donde 164 250 000.00 kWh equivalen a la energía producida en horas punta y 624 150 000.00 kWh a energía producida en horas fuera de punta.

El ingreso por venta de energía se resume a continuación:

Tabla 24. Ingresos por venta de Energía para despacho base

INGRESO POR VENTA DE ENERGÍA – DESPACHO EN BASE			
Horas Punta		Horas Fuera de Punta	
Costo HP(\$/kWh)	0.07262	Costo FHP (\$/kWh)	0.05923
Consumo anual HP (kWh)	164 250 000	Consumo anual FHP (kWh)	624 150 000
Venta Total de Energía anual HP (\$)	11 927 835.00	Venta Total de Energía anual FHP (\$)	36 968 404.50

Fuente: Elaboración propia de los autores.

La venta total por concepto de energía generada asciende al monto de \$ 48 896 239.50 anuales, considerando horas punta y horas fuera de punta.

Despacho en Media Punta

La potencia de generación de la central será de 100 MW, considerando un factor de planta de 0.9, además de 5 horas en punta y 9 horas fuera de punta. Se tiene una energía producida de 459 900 000.00 kWh en total, donde 164 250 000.00 kWh equivalen a la energía producida en horas punta y 295 650 000.00 kWh a energía producida en horas fuera de punta.

El ingreso por venta de energía se resume a continuación:

Tabla 25. *Ingreso por venta de Energía para despacho media punta*

INGRESO POR VENTA DE ENERGÍA – DESPACHO MEDIA PUNTA			
Horas Punta		Horas Fuera de Punta	
Costo HP(\$/kWh)	0.07262	Costo FHP (\$/kWh)	0.05923
Consumo anual HP (kWh)	164 250 000	Consumo anual FHP (kWh)	295 650 000
Venta Total de Energía anual HP (\$)	11 927 835.00	Venta Total de Energía anual FHP (\$)	17 511 349.50

Fuente: Elaboración propia de los autores.

La venta total por concepto de energía generada asciende al monto de \$ 29 439 184.50 anuales, considerando horas punta y horas fuera de punta.

b. Por concepto de venta de Potencia

El precio de la potencia en barra (PPM) en la subestación de Callalli asciende al monto de \$ 7.3989/kW-mes. Este valor se mantendrá constante durante el tiempo de vida del proyecto con el fin de simplificar el análisis.

Despacho en Base

La potencia firme que entrega la central geotérmica es de 98 MW, considerando las pérdidas después de la turbina y de la transmisión a la subestación, asumiendo una eficiencia del 98%, es decir, por cada 100 MW de potencia instalada, se entrega 98 MW de potencia firme al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

La información se resume en la tabla:

Tabla 26. *Ingreso por venta de Potencia para despacho en base*

Ingreso por venta de potencia	
Costo (\$/kW-mes)	7.3989
Potencia firme anual (MW)	98.00
Venta total anual de potencia (\$)	8 701 106.40

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Despacho en Media Punta

La potencia firme que entrega la central geotérmica es de 57.17 MW, considerando las pérdidas después de la turbina y de la transmisión a la subestación, asumiendo una eficiencia del 98%, es decir, por cada 100 MW de

potencia instalada, se entrega 57.17 MW de potencia firme al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

La información se resume en la tabla:

Tabla 27. *Ingreso por venta de Potencia para despacho en media punta*

Ingreso por venta de potencia	
Costo (\$/kW-mes)	7.3989
Potencia firme anual (MW)	57.17
Venta total anual de potencia (\$)	5 075 941.36

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 28. Costos, gastos e ingresos para determinar la rentabilidad de la central para despacho en base

Año	Inversión	O&M	Permisos	Venta de energía	Venta de Potencia	Ingreso Bruto	Impuesto a la Renta	Ingreso Neto	Ingreso Neto Actualizado
0	\$ -104,860,000							\$ -104,860,000	\$ -104,860,000
1		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 36,421,771	\$ 33,414,469
2		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 35,020,934	\$ 29,476,419
3		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 33,673,975	\$ 26,002,487
4		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 32,378,822	\$ 22,937,974
5		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 31,133,483	\$ 20,234,628
6		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 29,936,041	\$ 17,849,883
7		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 28,784,655	\$ 15,746,192
8		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 27,677,553	\$ 13,890,430
9		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 26,613,032	\$ 12,253,379
10		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 25,589,453	\$ 10,809,262
11		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 24,605,244	\$ 9,535,340
12		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 23,658,888	\$ 8,411,556
13		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 22,748,931	\$ 7,420,215
14		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 21,873,972	\$ 6,545,709
15		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 21,032,665	\$ 5,774,267
16		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 20,223,717	\$ 5,093,743
17		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 19,445,881	\$ 4,493,422
18		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 18,697,963	\$ 3,963,851
19		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 17,978,811	\$ 3,496,693
20		\$ 3,180,000	\$ 305,000	\$ 48,896,240	\$ 8,701,106	\$ 54,112,346	\$ 16,233,704	\$ 17,287,318	\$ 3,084,591

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 29. Costos e ingresos para determinar la rentabilidad de la central para despacho en media punta

Año	Inversión	O&M	Permisos	Venta de energía	Venta de Potencia	Ingreso Bruto	Impuesto a la Renta	Ingreso Neto	Ingreso Neto Actualizado
0	\$ -104,860,000							\$ -104,860,000	\$ -104,860,000
1		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 21,777,489	\$ 19,979,347
2		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 20,939,893	\$ 17,624,689
3		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 20,134,512	\$ 15,547,538
4		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 19,360,108	\$ 13,715,189
5		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 18,615,488	\$ 12,098,790
6		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 17,899,508	\$ 10,672,892
7		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 17,211,066	\$ 9,415,042
8		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 16,549,101	\$ 8,305,436
9		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 15,912,598	\$ 7,326,602
10		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 15,300,575	\$ 6,463,128
11		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 14,712,091	\$ 5,701,419
12		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 14,146,241	\$ 5,029,480
13		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 13,602,155	\$ 4,436,733
14		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 13,078,995	\$ 3,913,843
15		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 12,575,957	\$ 3,452,579
16		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 12,092,266	\$ 3,045,676
17		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 11,627,179	\$ 2,686,729
18		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 11,179,980	\$ 2,370,086
19		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 10,749,981	\$ 2,090,760
20		\$ 1,855,000	\$ 305,000	\$ 29,439,185	\$ 5,075,941	\$ 32,355,126	\$ 9,706,538	\$ 10,336,520	\$ 1,844,354

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Una vez elaborado el cuadro para la evaluación económica financiera, se resume la información en la Tabla 30 para despacho en base y en la Tabla 31 para despacho en media punta.

Tabla 30. *Resumen de indicadores de rentabilidad para despacho en base*

Evaluación de los indicadores de rentabilidad	
Inversión	- \$ 104 860 000.00
Ingreso total neto actualizado	\$ 260 434 511.00
VAN (20 años)	\$ 155 574 511.00
TIR	30.81%
Tasa de descuento	9%
Inflación	4%
t_r (años)	3.70

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 31. *Resumen de indicadores de rentabilidad para despacho en media punta*

Evaluación de los indicadores de rentabilidad	
Inversión	- \$ 104 860 000.00
Ingreso total neto actualizado	\$ 155 720 312.00
VAN (20 años)	\$ 50 860 312.00
TIR	16.47%
Tasa de descuento	9%
Inflación	4%
t_r (años)	7.70

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Se puede concluir que para el despacho en base se obtiene un VAN de \$ 155 574 511.00 con una TIR de 30.81% y un tiempo de retorno de la inversión de 3.70 años, demostrando que, para este análisis, el proyecto es rentable, atractivo y con excelentes beneficios para invertir.

Para el caso de despacho en media punta, el VAN es de \$ 50 860 312.00 con una TIR de 16.47% y un tiempo de retorno de la inversión de 7.70 años. Se podría decir que el proyecto para este análisis es rentable, pero con beneficios bajos con respecto al despacho en base, además de que se recupera la inversión en un plazo de 7.70 años, mayor al obtenido en despacho en base. Concluyendo que también es rentable, pero en menor medida con respecto al despacho en base.

Tabla 32. *Expectativa de inflación período 2022-2023*

ENCUESTA DE EXPECTATIVA DE INFLACIÓN (En porcentajes)				
	RI Jun.21	RI Set.21	RI Dic.21	RI Mar.22*
Sistema Financiero				
2022	2,20	3,00	3,50	3,80
2023			3,00	3,00
Analistas Económicos				
2022	2,45	2,55	3,55	4,00
2023			2,80	3,00
Empresas No Financieras				
2022	2,30	3,00	3,21	4,00
2023			3,00	3,20

* Encuesta realizada al 28 de febrero.
Fuente: BCRP.

Fuente: (BCRP, 2022)

La inflación considerada para la presente investigación es de 4%, considerando empresas no financieras y que está se mantiene en el tiempo, partiendo desde el 2022.

Tabla 33. *Horizontes de evaluación para proyectos de inversión*

Intervalo (años)	Horizonte de evaluación
0-5	Futuro inmediato
6-20	Futuro mediano
21-50	Futuro lejano
51-100	Futuro muy lejano

Fuente: (Castillo & Zhangallimbay, 2021)

De acuerdo con la Tabla 33, se ha escogido un horizonte de evaluación para el proyecto de 20 años, es decir, un futuro mediano, esto debido a que la vida útil de los proyectos de Centrales Térmicas es mayor a 20 años porque su equipamiento principal posee dichas características, además cabe precisar de acuerdo con la Ley de Concesiones Eléctricas del Perú, donde indica en el Artículo 21°, que el tiempo para una concesión eléctrica es indefinido , es por ello que para el proyecto se ha considerado una vida útil de 20 años.

De igual forma para la tasa de descuento, se ha considerado la información del Anexo 9, donde indica que, para el Perú, es de 9%.

V. DISCUSIÓN

De la investigación realizada por El Haj Assad et al. (2021) donde obtuvo eficiencias máximas para tres escenarios distintos en una central geotérmica de 12.5, 11 y 9.5% para las temperaturas de 300, 275 y 250 °C, respectivamente, donde el ciclo termodinámico empleado es single flash, donde al comparar con la eficiencia obtenida en esta investigación que fue de 16.87% empleando un ciclo termodinámico binario Rankine de potencia, lo que demuestra que emplear dicho ciclo termodinámico aumenta la eficiencia en una central geotermoeléctrica.

En la tesis elaborada por Quispe Huayta (2021) donde tuvo un resultado para el flujo másico de fluido geotérmico de 162.105 kg/s y un flujo másico para el fluido orgánico de trabajo de 66.369 kg/s, considerando una potencia de generación de 1.5 MW para la ciudad de Putina, empleando el refrigerante R134a como fluido de trabajo. Al comparar dichos resultados con los cálculos en la actual investigación, es razonable mencionar que dichos valores son muchos mayores debido a que se desea generar una potencia mucho mayor a la propuesta por dicho autor, donde el flujo másico del fluido geotérmico fue 1165.61 kg/s y con un flujo másico para el fluido orgánico de trabajo R410a de 4819.466 kg/s, para poder generar 100 MW de potencia eléctrica.

Curi Yauri (2021) menciona que se tiene un potencial alto en energía geotérmica en el sur del Perú que puede ser aprovechada empleando centrales geotermoeléctricas, donde esto brindaría poder cubrir gran parte del déficit de producción eficiente en el Sur, pero que debido a la falta de estudios de mayor envergadura sobre costos y tiempos de implantación de la mencionada tecnología. Es por ello que se realizó la actual investigación para poder determinar si es viable el poder emplear la energía geotérmica para producir energía eléctrica y ser aprovechada para cubrir la matriz energética del país.

El autor Bulnes Jiménez (2018) en su tesis obtuvo un caudal o flujo másico para el fluido orgánico de trabajo de 101.1 kg/s para una potencia de generación de 4.5 MW empleando el Isobutano como fluido de trabajo. En comparación a la actual investigación que fue de 4819.466 kg/s para flujo másico de trabajo R410a, para

generar una potencia de 100 MW, es razonable dicho valor ya que la potencia es mucho mayor a la propuesta en la tesis de dicho autor.

En relación a la eficiencia obtenida para la central geotérmica propuesta por Bulnes Jiménez (2018) que fue de 11.7%, que al compararse con la obtenida en esta investigación que fue de 16.87% para un ciclo binario de potencia, este aumento puede deberse a que la potencia de generación es mayor y que el fluido orgánico de trabajo empleado es diferente. En la investigación de Bulnes Jiménez (2018) para la central geotérmica propuesta obtuvo una inversión de S/. 56 000 000, con un ingreso anual debido a la venta de energía de S/. 17 416 020. Donde al realizar el análisis de rentabilidad obtuvo un VAN de S/. 60 694 413 con una TIR de 12%, para una potencia de 4.5 MW y una vida útil de 20 años para la central geotérmica, lo que determinó que el proyecto era atractivo, factible y rentable como inversión. Al comparar con los resultados obtenidos en la actual investigación, donde el VAN obtenido fue de \$ 155 574 511 con una TIR de 30.81% y un tiempo de retorno de la inversión de 3.70 años, para una central geotérmica de 100 MW de potencia de generación de electricidad, donde los resultados obtenidos son mucho mayores debido a la variación en la potencia de generación, es por ello, verificar un aumento considerable en el VAN y la TIR.

Acosta Ospina (2020), concluyeron en su investigación que las energías renovables se han vuelto el centro de atención mundial, como una alternativa con un enorme potencial para la transición energética en cualquier país y para disminuir el impacto ambiental, además de que representan y poseen un alto potencial económico para la sociedad que logran contar con dichos recursos energéticos renovables. Por lo tanto, la presente investigación demuestra su importancia ya que se ha realizado el diseño de una central termoeléctrica, la cual traerá enormes beneficios, como son una reducción en la contaminación ambiental y gases de efecto invernadero originados por la quema de combustibles fósiles, además de representar un recurso energético renovable.

Basosi et al. (2020) en su investigación logró determinar que las centrales eléctricas que emplean recursos renovables son realmente beneficiosas para la mitigación del impacto ambiental, por ejemplo, una central geotermoeléctrica obtuvo una puntuación mayor en relación a una central fotovoltaica pero una planta eólica es la que obtiene un menor puntaje, es decir, que una central eólica contamina menos en comparación con una central geotérmica y fotovoltaica, pero que estas últimas son mejores en relación a centrales térmicas que emplean combustibles fósiles o recursos energéticos no renovables. Esto demuestra la importancia de haber realizado la presente investigación, porque de acuerdo con el autor mencionado, permitirá una considerable reducción en la mitigación del impacto ambiental.

Martínez Ruiz et al. (2021) manifiestan que los proyectos de inversión con referencia en energía, se evalúan empleando métodos y técnicas clásicas, asumiendo que el panorama se mantiene estático con respecto a los flujos de efectivo, lo que resulta realmente insuficiente ya que no se consideran ciertos riesgos vinculados a las variables de entrada y sin tener en cuenta la flexibilidad de aquellos inversionistas, lo cual se relaciona directamente para la toma de decisiones. Del análisis se determinó que, utilizando las técnicas y métodos clásicos, se puede clasificar al proyecto como no viable, no obstante, al considerar la flexibilidad de la inversión, el resultado fue atractivo. Entonces, a la hora de determinar la viabilidad financiera de una inversión, se debe tener en cuenta los factores de incertidumbre y riesgo. Entonces, se puede decir que la presente investigación determinó que la propuesta de diseño de una central geotermoeléctrica es atractiva y rentable, ya que se considero ciertos parámetros al momento de realizar el análisis de rentabilidad, como son la tasa de descuento e inflación.

Pantoja y Parancan (2016) en su investigación concluyeron que un factor relevante es la eficiencia, es decir, la relación Costo/Utilidad que conlleva el uso de dicha energía, reducir el impacto ambiental es otro factor relevante, ya que la energía geotérmica es ecoamigable, obtener beneficios económicos en un futuro debido a los bonos verdes promovidos a nivel mundial, que se tenga apoyo gubernamental y un amplio conocimiento científico referente a la energía a emplear. Esto permite

deducir que el emplear como fuente a la energía geotérmica para la propuesta de desarrollar una central geotermoeléctrica para generar electricidad es realmente interesante y novedoso para el país, esto debido a que posee una eficiencia relativamente alta además de permitir la reducción del impacto ambiental y los gases de efecto invernadero, obtener grandes beneficios en el largo plazo debido a los bonos verdes que son promovidos por el estado y a nivel mundial.

Vásquez et al. (2017), en su publicación abordan aspectos económicos y tecnológicos de la producción de energía eléctrica partir de recursos renovables no convencionales y ayudando a bajar las emisiones de CO_2 (como la energía nuclear). Las cuales tratan de tecnologías que están actualmente muy desarrolladas, como la geotérmica, solar, etcétera. En mención a lo indicado por estos autores, quienes afirman que el emplear a la energía geotérmica como una fuente de energía renovable para producción de energía eléctrica viene a ser altamente económico además de que permitirá en el futuro obtener mejoras en el desarrollo de dicha tecnología que es empleada en países desarrollados debido a sus grandes aportaciones, beneficios y permitir una reducción considerable en el impacto ambiental.

VI. CONCLUSIONES

- Al realizar un análisis comparativo entre diferentes fluidos orgánicos de trabajo, el que permite optimizar y además brindar características importantes como cero emisiones al medio ambiente y no perjudicial para el ser humano, es el refrigerante R410a, con un promedio ponderado de 3.80, el mayor de todos al realizar el análisis de comparación.
- Del análisis termodinámico, se obtuvo un flujo másico de refrigerante R410a en el ciclo binario Rankine de potencia de 4819.466 kg/s y que, al realizar un análisis de balance de masa y energía en el intercambiador de calor, se obtuvo un flujo másico de fluido geotérmico de 1165.61 kg/s para poder generar una potencia de 100 MW para central geotermoeléctrica.
- El equipamiento adecuado con el que debe contar la central geotermoeléctrica para poder producir 100 MW de potencia es una turbina de vapor Siemens SST-500 con una potencia ajustada de 100 MW, un generador de potencia Siemens SGen6-100A-2P con una potencia aparente de ajuste de 140 MVA, ocho bombas de alimentación cada una de 2800 HP de potencia denominada Bomba Grande Power Quintuplex émbolo, un intercambiador de calor Alfa Laval modelo CP150 con una capacidad de 6000 m³/h y un sistema de tuberías para el sistema de extracción e inyección de fluido geotérmico de 14 pulgadas.
- Los indicadores de rentabilidad son mayores para el despacho en base que para el despacho en media punta, donde se obtuvo un VAN de \$ 155 574 511.00 con una TIR de 30.81% y un tiempo de retorno de la inversión de 3.70 años, demostrando que, para este análisis, el proyecto es rentable, atractivo y con excelentes beneficios para invertir.

VII. RECOMENDACIONES

- Para realizar un adecuado análisis comparativo se recomienda buscar todas las características de cada fluido orgánico de trabajo y luego hacer una matriz de ponderación para determinar cual sería el más adecuado de acuerdo a la ponderación obtenida.
- Para poder determinar correctamente los flujos másicos, se debe realizar un adecuado balance de masa y energía donde todo parte del análisis termodinámico y de las tablas empleadas, las mismas que deben ser la más actuales posibles y para poder saber si son correctos los datos calculados se recomienda evaluarlos y compararlos con los datos obtenidos de algún software.
- Al momento de seleccionar el equipamiento, se debe considerar que los mismos posean la más alta eficiencia en relación al costo, para poder optimizar la generación de energía en la central geotermoeléctrica.
- Para el análisis de los indicadores de rentabilidad, se debe buscar información de fuentes confiables sobre los costos para centrales geotérmicas, aunque cabe precisar que cada año la inflación aumenta, lo que provoca cambios considerables en los costos, más aún considerando la pandemia originada por la Covid-19, que afectó en gran medida la economía mundial.

REFERENCIAS

- Acosta Ospina, L. (2020). *Propuesta para el desarrollo de un Proyecto Geotérmico en Cascada en el Municipio de Villamaría, Caldas*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana - Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.
- Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). (2012). *Plan Maestro para el desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú*. Ministerio de Energía y Minas - República del Perú.
- Basosi, R., Bonciani, R., Frosali, D., & Manfreda, G. (2020). Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems. *Sustainability*, 12(2786). <https://doi.org/10.3390/su12072786>
- BCRP. (2022). *Reporte de inflación: Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2022-2023*. Banco Central de Reserva del Perú (BCRP).
- Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2019). *Fundamentals of Thermodynamics* (10ma ed.). Estados Unidos: Wiley.
- Bulnes Jiménez, J. A. (2018). *Dimensionamiento y selección de una central geotérmica basada en el ciclo Rankine Orgánico ubicada en el yacimiento geotérmico Jesús María - Moquegua*. Repositorio de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Cárcel Carrasco, F. J., & Martínez Márquez, D. (2015). La Energía Geotérmica de baja entalpía. *3C Tecnología*, 4(3), 96-108. <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2015.v4n3e15.96-108>
- Castillo, J. G., & Zhangallimbay, D. (2021). La tasa social de descuento en la evaluación de proyectos de inversión: Una aplicación para el Ecuador. *Revista de la CEPAL*, 134, 77-98.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer* (6ta ed.). United States of America: Mc Graw Hill.

- Çetiner, Z. S., Ertekin, C., & Gültay, B. (2016). Initial Assessment of Public Perception and Acceptance of Geothermal Energy Applications in Çanakkale. *Energy Procedia*, 1(97), 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.052>
- Curi Yauri, J. C. (2021). *Evaluación de la generación eléctrica con recurso geotérmico en la región Sur Peruana*. Repositorio de la Universidad de Ingeniería y Tecnología.
- De Bruijn, E. (2020). *The sustainability of Geothermal Energy*. Repository of Delft University of Technology.
- Díaz Huaina, G. N., & Guadalupe Gómez, E. (2021). Volcanic calderas and its relation to geothermal resources in southern Peru. *Revistas Investigación*, 24(47), 57-62. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20645>
- Ecología Hoy. (2021). *Energía Geotérmica*. Retrieved 12 de agosto de 2021, from <https://ecologiahoy.net/energias/energia-geotermica/>
- El Haj Assad, M., Aryanfar, Y., Radman, S., Yousef, B., & Pakatchian, M. (2021). Energy and exergy analyses of single flash geothermal power plant at optimum separator temperature. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16, 873-881. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab014>
- El Haj Assad, M., Bani-Hani, E., & Khalil, M. (2017). Performance of geothermal power plants (single, dual, and binary) to compensate for LHC CERN power consumption: comparative study. *Geothermal Energy*, 5(17). <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0074-z>
- ENEL Green Power. (2021). *Central Geotérmica*. Retrieved 8 de octubre de 2021, from <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-geotermica/central-geotermica>
- Feng, L., Chen, H., Zhou, Y., Zhang, S., Yang, T., & An, L. (2016). The development of a thermo-economic evaluation method for solar aided power generation. *Energy Conversion and Management*, 116, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.072>
- Gamio Aita, P. (2017). Energía: Un cambio necesario en el Perú. *Revista Kawsaypacha*(1), 93-135. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.201701.004>

Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2016). *Fuentes de Energía Renovables y Mitigación del Cambio Climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Guerrero Cevallos, W. M. (2019). *Estudio y optimización para la perforación de Pozos Geotérmicos en Ecuador basados en la experiencia del Pozo Exploratorio Chachimbiro 1*. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Gutierrez Paco, A., & Quispe Carlo, O. (2018). *Evaluación del potencial geotérmico de baja temperatura para aplicaciones de calefacción con bombas de calor*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas.

Hernández Ochoa, A. F., Aragón Aguilar, A., & Franco Nava, J. M. (2021). 7 - An up-to-date perspective of geothermal power technology. *Sustainable Fuel Technologies Handbook*, 201-239. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00008-1>.

ICGC. (2019). *¿Qué es un yacimiento geotérmico?* Retrieved 4 de agosto de 2021, from Tipos de yacimientos geotérmicos: <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-Tipos-de-yacimientos-geotermicos>

IGA (International Geothermal Association). (2018). *Geothermal Quick Guide*. Retrieved 6 de noviembre de 2021, from <https://www.geothermalenergy.org/explore/what-is-geothermal/>

Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). (2021). *¿Qué es un yacimiento geotérmico?* Retrieved 8 de octubre de 2021, from <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-Tipos-de-yacimientos-geotermicos>

IRENA. (4 de Agosto de 2021). *Energía Geotérmica*. Agencia Internacional de Energías Renovables: <https://www.irena.org/geothermal>

Ji Zhen, L., Yan, S., De Liang, Z., Hu, Y., & Lv, Y. (2015). A dynamic model used for controller design of a coal fired once-through boiler-turbine unit. *Energy*, 93, 2069-2078. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.077>

- Kępińska, B., & Kasztelewicz, A. (2015). Public Perception of Geothermal Energy in Selected European Countries. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, 1(1), 1-12.
- Li, Y., Wang, Y., Cao, L., Hu, P., & Han, W. (2018). Modeling for the performance evaluation of 600 MW supercritical unit operating No.0 high pressure heater. *Energy, Elsevier*, 149, 639-661. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.103>
- Lozada, J. (2015). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 34-39.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Martínez Ruiz, Y., Manotas Duque, D. F., & Ramírez Malule, H. (2021). Real Options Analysis for Financial Valuation of Geothermal Energy Projects in Colombia. *CEA*, 7(15). <https://doi.org/10.22430/24223182.1944>
- Meier, P. M., Alcolea Rodríguez, A., & Bethmann, F. (2015). Lessons Learned from Basel: New EGS Projects in Switzerland Using Multistage Stimulation and a Probabilistic Traffic Light System for the Reduction of Seismic Risk. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, 1-8.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering thermodynamics* (9na ed.). United States of America: Wiley.
- Negawo, W. J. (2016). A review on the Geomaterial Aspects of Geothermal Reservoirs and Its Exploration. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(6), 229-238.
- Palacio Villa, M. A., Blessent, D., López Sánchez, J., & Moreno, D. (2020). Sistemas geotérmicos mejorados: revisión y análisis de casos de estudio. *Boletín de Geología*, 42(1), 101-118. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n1-2020006>
- Pantoja Lara, E. M., & Parancan Raipane, C. E. (2016). *Análisis de la Energía Geotérmica para su implementación en el Área de Salud específicamente*

Hospitales y CESFAM de la ciudad de Puerto Montt - Calbuco, Región de Los Lagos. Puerto Montt, Chile: Universidad Austral de Chile.

Pazheri, F. R., Othman, M. F., & Malik, N. H. (2015). A review on global renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 835-845. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.020>

Porras, H., Martínez, A., & Herrera, M. M. (2018). An analysis of the economic consequences of the lack of coverage of Non-Conventional Renewable Energy in Colombia. *Inventum*, 13(25), 41-52. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.13.25.2018.41-52>

Prieto Guerrero, A., & Espinosa Paredes, G. (2019). Linear and Non-linear Stability Analysis in Boiling Water Reactors. *Woodhead Publishing*, 1-465. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01640-3>

Quispe Huayta, F. B. (2021). *Análisis y Evaluación del potencial geotérmico para su aprovechamiento mediante una central de ciclo binario para generación de potencia eléctrica en la ciudad de Putina, Región Puno – Perú.* Repositorio de la Universidad Nacional del Altiplano.

Rivera Delgado, D., Díaz López, F. J., & Carrillo Gonzáles, G. (2021). Energy transition, innovation, and direct uses of geothermal Energy in México: A thematic modeling analysis. *Problemas de desarrollo*, 52(206), 115-141. <https://doi.org/10.22201/iiiec.20078951e.2021.206.69713>

Salazar-Pereyra, M., Mora-Ortega, A., Bonilla-Blancas, A. E., Lugo-Leyte, R., & Lugo-Méndez, H. D. (2017). Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos. *DYNA*, 84(203), 273-282. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n203.66126>

Sinaga, R. H., & Darmanto, P. S. (2016). Energy Optimization Modeling of Geothermal Power Plant (Case Study: Darajat Geothermal Field Unit III). *Series: Earth and Environmental Science*, 42(012017). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012017>

Stępczyńska-Drygas, K., Łukowicz, H., & Dykas, S. (2013). Calculation of an advanced ultra-supercritical power unit with CO₂ capture installation. *Energy*

Conversion and Management, 74, 201-208.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.045>

Vásquez Cordano, A. L., Tamayo Pacheco, J. F., & Salvador Jácome, J. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Lima - Perú: Osinergmin.

Vásquez, R., & Arroyo, P. (2016). *Ingeniería Económica: ¿Cómo medir la rentabilidad de un proyecto?* (1ra ed.). Universidad de Lima.

Younas, U., Khan Khan, B., Ali, S., & Mehmood, C. A. (2016). Pakistan geothermal renewable energy potential for electric power generation: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(63), 398-413.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.038>

Zhou, L., Xu, G., Zhao, S., Xu, C., & Yang, Y. (2016). Parametric analysis and process optimization of steam cycle in double reheat ultra-supercritical power plants. *Applied Thermal Engineering*, 99, 652-660.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.047>

ANEXOS

Anexo 1: Cuadro de Operacionalización de variables.

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Dependiente Campo Geotérmico Calacoa - Putina	Es aquella zona del subsuelo donde se puede extraer calor del interior de la Tierra, con el fin de aprovecharlo de forma rentable. Para determinar las características de funcionamiento es necesario conocer sus parámetros de funcionamiento, costos de explotación y costos de O&M. (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), 2021)	Los parámetros del campo geotérmico se obtendrán de forma experimental empleando la técnica de revisión documental, ya que se tiene un estudio previo de sus características. (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012)	Parámetros de funcionamiento	- Temperatura - Flujo de masa - Entalpía	De razón.
			Costos de Explotación	- Costo de extracción - Costo de Reinyección	
			Costos de O&M	- Costo de operación - Costo de mantenimiento	
Independiente Central Geotermoeléctrica	Una central geotermoeléctrica posee la capacidad de producir energía eléctrica empleando el calor del interior de la Tierra. Su diseño abarca la selección de los componentes que la conforman como las bombas, turbinas, generador, intercambiador de calor, separador, pozos de producción, etcétera. Es importante conocer los parámetros de funcionamiento para conocer cómo opera. Para determinar la rentabilidad de la central es necesario conocer el costo de inversión, costos de funcionamiento y los ingresos. Con los datos financieros mencionados ya se puede realizar un análisis de rentabilidad. (ENEL Green Power, 2021)	Partiendo de los parámetros iniciales, se podrán obtener de forma experimental los parámetros restantes empleando la técnica de revisión documental. Una vez conocidos se podrá determinar el flujo másico del fluido orgánico de trabajo de acuerdo a la potencia que se requiere generar. Para ello, la central contará con un ciclo Rankine binario de potencia.	Parámetros de funcionamiento	- Temperatura - Presión - Flujo másico - Potencia Activa - Energía producida - Potencia Aparente - Eficiencia - Factor de carga	De razón.
			Inversión	- Costo de Exploración - Costo de construcción de pozos y vapor ductos - Costo de subestación - Costo de transmisión - Costo de subproyectos	
			Costos de funcionamiento	- Costo de O&M - Costo de permisos	
			Ingresos	- Venta por concepto de energía - Venta por concepto de potencia	
			Análisis de rentabilidad	- VAN, TIR - Tiempo de retorno de la inversión - Relación Beneficio/Costo	

Anexo 2 – Propiedades termodinámicas para el fluido R410a

TABLE B.4

Thermodynamic Properties of R-410a

TABLE B.4.1

Saturated R-410a

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
-60	64.1	0.000727	0.36772	0.36845	-27.50	256.41	228.91
-55	84.0	0.000735	0.28484	0.28558	-20.70	251.89	231.19
-51.4	101.3	0.000741	0.23875	0.23949	-15.78	248.59	232.81
-50	108.7	0.000743	0.22344	0.22418	-13.88	247.31	233.43
-45	138.8	0.000752	0.17729	0.17804	-7.02	242.67	235.64
-40	175.0	0.000762	0.14215	0.14291	-0.13	237.95	237.81
-35	218.4	0.000771	0.11505	0.11582	6.80	233.14	239.94
-30	269.6	0.000781	0.09392	0.09470	13.78	228.23	242.01
-25	329.7	0.000792	0.07726	0.07805	20.82	223.21	244.03
-20	399.6	0.000803	0.06400	0.06480	27.92	218.07	245.99
-15	480.4	0.000815	0.05334	0.05416	35.08	212.79	247.88
-10	573.1	0.000827	0.04470	0.04553	42.32	207.36	249.69
-5	678.9	0.000841	0.03764	0.03848	49.65	201.75	251.41
0	798.7	0.000855	0.03182	0.03267	57.07	195.95	253.02
5	933.9	0.000870	0.02699	0.02786	64.60	189.93	254.53
10	1085.7	0.000886	0.02295	0.02383	72.24	183.66	255.90
15	1255.4	0.000904	0.01955	0.02045	80.02	177.10	257.12
20	1444.2	0.000923	0.01666	0.01758	87.94	170.21	258.16
25	1653.6	0.000944	0.01420	0.01514	96.03	162.95	258.98
30	1885.1	0.000968	0.01208	0.01305	104.32	155.24	259.56
35	2140.2	0.000995	0.01025	0.01124	112.83	147.00	259.83
40	2420.7	0.001025	0.00865	0.00967	121.61	138.11	259.72
45	2728.3	0.001060	0.00723	0.00829	130.72	128.41	259.13
50	3065.2	0.001103	0.00597	0.00707	140.27	117.63	257.90
55	3433.7	0.001156	0.00482	0.00598	150.44	105.34	255.78
60	3836.9	0.001227	0.00374	0.00497	161.57	90.70	252.27
65	4278.3	0.001338	0.00265	0.00399	174.59	71.59	246.19
70	4763.1	0.001619	0.00124	0.00286	194.53	37.47	232.01
71.3	4901.2	0.00218	0	0.00218	215.78	0	215.78

TABLE B.4.1 (continued)

Saturated R-410a

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
-60	64.1	-27.45	279.96	252.51	-0.1227	1.3135	1.1907
-55	84.0	-20.64	275.83	255.19	-0.0912	1.2644	1.1732
-51.4	101.3	-15.70	272.78	257.08	-0.0688	1.2301	1.1613
-50	108.7	-13.80	271.60	257.80	-0.0603	1.2171	1.1568
-45	138.8	-6.92	267.27	260.35	-0.0299	1.1715	1.1416
-40	175.0	0	262.83	262.83	0	1.1273	1.1273
-35	218.4	6.97	258.26	265.23	0.0294	1.0844	1.1139
-30	269.6	13.99	253.55	267.54	0.0585	1.0428	1.1012
-25	329.7	21.08	248.69	269.77	0.0871	1.0022	1.0893
-20	399.6	28.24	243.65	271.89	0.1154	0.9625	1.0779
-15	480.4	35.47	238.42	273.90	0.1435	0.9236	1.0671
-10	573.1	42.80	232.98	275.78	0.1713	0.8854	1.0567
-5	678.9	50.22	227.31	277.53	0.1989	0.8477	1.0466
0	798.7	57.76	221.37	279.12	0.2264	0.8104	1.0368
5	933.9	65.41	215.13	280.55	0.2537	0.7734	1.0272
10	1085.7	73.21	208.57	281.78	0.2810	0.7366	1.0176
15	1255.4	81.15	201.64	282.79	0.3083	0.6998	1.0081
20	1444.2	89.27	194.28	283.55	0.3357	0.6627	0.9984
25	1653.6	97.59	186.43	284.02	0.3631	0.6253	0.9884
30	1885.1	106.14	178.02	284.16	0.3908	0.5872	0.9781
35	2140.2	114.95	168.94	283.89	0.4189	0.5482	0.9671
40	2420.7	124.09	159.04	283.13	0.4473	0.5079	0.9552
45	2728.3	133.61	148.14	281.76	0.4765	0.4656	0.9421
50	3065.2	143.65	135.93	279.58	0.5067	0.4206	0.9273
55	3433.7	154.41	121.89	276.30	0.5384	0.3715	0.9099
60	3836.9	166.28	105.04	271.33	0.5729	0.3153	0.8882
65	4278.3	180.32	82.95	263.26	0.6130	0.2453	0.8583
70	4763.1	202.24	43.40	245.64	0.6752	0.1265	0.8017
71.3	4901.2	226.46	0	226.46	0.7449	0	0.7449

TABLE B.4.2
Superheated R-410a

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
	50 kPa (-64.34°C)				100 kPa (-51.65°C)			
Sat.	0.46484	226.90	250.15	1.2070	0.24247	232.70	256.94	1.1621
-60	0.47585	229.60	253.40	1.2225	—	—	—	—
-40	0.52508	241.94	268.20	1.2888	0.25778	240.40	266.18	1.2027
-20	0.57295	254.51	283.16	1.3504	0.28289	253.44	281.73	1.2667
0	0.62016	267.52	298.53	1.4088	0.30723	266.72	297.44	1.3265
20	0.66698	281.05	314.40	1.4649	0.33116	280.42	313.54	1.3833
40	0.71355	295.15	330.83	1.5191	0.35483	294.64	330.12	1.4380
60	0.75995	309.84	347.83	1.5717	0.37833	309.40	347.24	1.4910
80	0.80623	325.11	365.43	1.6230	0.40171	324.75	364.92	1.5425
100	0.85243	340.99	383.61	1.6731	0.42500	340.67	383.17	1.5928
120	0.89857	357.46	402.38	1.7221	0.44822	357.17	401.99	1.6419
140	0.94465	374.50	421.74	1.7701	0.47140	374.25	421.39	1.6901
160	0.99070	392.12	441.65	1.8171	0.49453	391.89	441.34	1.7372
180	1.03671	410.28	462.12	1.8633	0.51764	410.07	461.84	1.7835
200	1.08270	428.98	483.11	1.9087	0.54072	428.79	482.86	1.8289
220	1.12867	448.19	504.63	1.9532	0.56378	448.02	504.40	1.8734
240	1.17462	467.90	526.63	1.9969	0.58682	467.74	526.42	1.9172
	150 kPa (-43.35°C)				200 kPa (-37.01°C)			
Sat.	0.16540	236.36	261.17	1.1368	0.12591	239.09	264.27	1.1192
-40	0.16851	238.72	263.99	1.1489	—	—	—	—
-20	0.18613	252.34	280.26	1.2159	0.13771	251.18	278.72	1.1783
0	0.20289	265.90	296.33	1.2770	0.15070	265.06	295.20	1.2410
20	0.21921	279.78	312.66	1.3347	0.16322	279.13	311.78	1.2995
40	0.23525	294.12	329.40	1.3899	0.17545	293.59	328.68	1.3553
60	0.25112	308.97	346.64	1.4433	0.18750	308.53	346.03	1.4090
80	0.26686	324.37	364.40	1.4950	0.19943	324.00	363.89	1.4610
100	0.28251	340.35	382.72	1.5455	0.21127	340.02	382.28	1.5117
120	0.29810	356.89	401.60	1.5948	0.22305	356.60	401.21	1.5611
140	0.31364	374.00	421.04	1.6430	0.23477	373.74	420.70	1.6094
160	0.32915	391.66	441.03	1.6902	0.24645	391.43	440.72	1.6568
180	0.34462	409.87	461.56	1.7366	0.25810	409.66	461.28	1.7032
200	0.36006	428.60	482.61	1.7820	0.26973	428.41	482.35	1.7487
220	0.37548	447.84	504.16	1.8266	0.28134	447.67	503.93	1.7933
240	0.39089	467.58	526.21	1.8705	0.29293	467.41	526.00	1.8372
260	0.40628	487.78	548.73	1.9135	0.30450	487.63	548.53	1.8803

TABLE B.4.2 (continued)
Superheated R-410a

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
	300 kPa (−27.37°C)				400 kPa (−19.98°C)			
Sat.	0.08548	243.08	268.72	1.0949	0.06475	246.00	271.90	1.0779
−20	0.08916	248.71	275.46	1.1219	—	—	—	—
0	0.09845	263.33	292.87	1.1881	0.07227	261.51	290.42	1.1483
20	0.10720	277.81	309.96	1.2485	0.07916	276.44	308.10	1.2108
40	0.11564	292.53	327.22	1.3054	0.08571	291.44	325.72	1.2689
60	0.12388	307.65	344.81	1.3599	0.09207	306.75	343.58	1.3242
80	0.13200	323.25	362.85	1.4125	0.09828	322.49	361.80	1.3773
100	0.14003	339.37	381.38	1.4635	0.10440	338.72	380.48	1.4288
120	0.14798	356.03	400.43	1.5132	0.11045	355.45	399.64	1.4788
140	0.15589	373.23	420.00	1.5617	0.11645	372.72	419.30	1.5276
160	0.16376	390.97	440.10	1.6093	0.12241	390.51	439.47	1.5752
180	0.17159	409.24	460.72	1.6558	0.12834	408.82	460.16	1.6219
200	0.17940	428.03	481.85	1.7014	0.13424	427.64	481.34	1.6676
220	0.18719	447.31	503.47	1.7462	0.14012	446.96	503.01	1.7125
240	0.19496	467.09	525.58	1.7901	0.14598	466.76	525.15	1.7565
260	0.20272	487.33	548.15	1.8332	0.15182	487.03	547.76	1.7997
280	0.21046	508.02	571.16	1.8756	0.15766	507.74	570.81	1.8422
	500 kPa (−13.89°C)				600 kPa (−8.67°C)			
Sat.	0.05208	248.29	274.33	1.0647	0.04351	250.15	276.26	1.0540
0	0.05651	259.59	287.84	1.1155	0.04595	257.54	285.12	1.0869
20	0.06231	275.02	306.18	1.1803	0.05106	273.56	304.20	1.1543
40	0.06775	290.32	324.20	1.2398	0.05576	289.19	322.64	1.2152
60	0.07297	305.84	342.32	1.2959	0.06023	304.91	341.05	1.2722
80	0.07804	321.72	360.74	1.3496	0.06455	320.94	359.67	1.3265
100	0.08302	338.05	379.56	1.4014	0.06877	337.38	378.65	1.3787
120	0.08793	354.87	398.84	1.4517	0.07292	354.29	398.04	1.4294
140	0.09279	372.20	418.60	1.5007	0.07701	371.68	417.89	1.4786
160	0.09760	390.05	438.85	1.5486	0.08106	389.58	438.22	1.5266
180	0.10238	408.40	459.59	1.5954	0.08508	407.98	459.03	1.5736
200	0.10714	427.26	480.83	1.6413	0.08907	426.88	480.32	1.6196
220	0.11187	446.61	502.55	1.6862	0.09304	446.26	502.08	1.6646
240	0.11659	466.44	524.73	1.7303	0.09700	466.11	524.31	1.7088
260	0.12129	486.73	547.37	1.7736	0.10093	486.42	546.98	1.7521
280	0.12598	507.46	570.45	1.8161	0.10486	507.18	570.09	1.7947
300	0.13066	528.62	593.95	1.8578	0.10877	528.36	593.62	1.8365

TABLE B.4.2 (continued)
Superheated R-410a

Temp. (°C)	<i>v</i> (m ³ /kg)	<i>u</i> (kJ/kg)	<i>h</i> (kJ/kg)	<i>s</i> (kJ/kg-K)	<i>v</i> (m ³ /kg)	<i>u</i> (kJ/kg)	<i>h</i> (kJ/kg)	<i>s</i> (kJ/kg-K)
	800 kPa (0.05°C)				1000 kPa (7.25°C)			
Sat.	0.03262	253.04	279.14	1.0367	0.02596	255.16	281.12	1.0229
20	0.03693	270.47	300.02	1.1105	0.02838	267.11	295.49	1.0730
40	0.04074	286.83	319.42	1.1746	0.03170	284.35	316.05	1.1409
60	0.04429	303.01	338.44	1.2334	0.03470	301.04	335.75	1.2019
80	0.04767	319.36	357.49	1.2890	0.03753	317.73	355.27	1.2588
100	0.05095	336.03	376.79	1.3421	0.04025	334.65	374.89	1.3128
120	0.05415	353.11	396.42	1.3934	0.04288	351.91	394.79	1.3648
140	0.05729	370.64	416.47	1.4431	0.04545	369.58	415.04	1.4150
160	0.06039	388.65	436.96	1.4915	0.04798	387.70	435.68	1.4638
180	0.06345	407.13	457.90	1.5388	0.05048	406.28	456.76	1.5113
200	0.06649	426.10	479.30	1.5850	0.05294	425.33	478.27	1.5578
220	0.06951	445.55	501.15	1.6302	0.05539	444.84	500.23	1.6032
240	0.07251	465.46	523.46	1.6746	0.05781	464.80	522.62	1.6477
260	0.07549	485.82	546.21	1.7181	0.06023	485.21	545.43	1.6914
280	0.07846	506.61	569.38	1.7607	0.06262	506.05	568.67	1.7341
300	0.08142	527.83	592.97	1.8026	0.06501	527.30	592.31	1.7761
	1200 kPa (13.43°C)				1400 kPa (18.88°C)			
Sat.	0.02145	256.75	282.50	1.0111	0.01819	257.94	283.40	1.0006
20	0.02260	263.39	290.51	1.0388	0.01838	259.18	284.90	1.0057
40	0.02563	281.72	312.48	1.1113	0.02127	278.93	308.71	1.0843
60	0.02830	299.00	332.96	1.1747	0.02371	296.88	330.07	1.1505
80	0.03077	316.06	352.98	1.2331	0.02593	314.35	350.64	1.2105
100	0.03311	333.24	372.97	1.2881	0.02801	331.80	371.01	1.2666
120	0.03537	350.69	393.13	1.3408	0.03000	349.46	391.46	1.3199
140	0.03756	368.51	413.59	1.3915	0.03192	367.43	412.13	1.3712
160	0.03971	386.75	434.40	1.4407	0.03380	385.79	433.12	1.4208
180	0.04183	405.43	455.62	1.4886	0.03565	404.56	454.47	1.4690
200	0.04391	424.55	477.24	1.5353	0.03746	423.77	476.21	1.5160
220	0.04597	444.12	499.29	1.5809	0.03925	443.41	498.36	1.5618
240	0.04802	464.14	521.77	1.6256	0.04102	463.49	520.92	1.6066
260	0.05005	484.60	544.66	1.6693	0.04278	483.99	543.88	1.6505
280	0.05207	505.48	567.96	1.7122	0.04452	504.91	567.25	1.6936
300	0.05407	526.77	591.66	1.7543	0.04626	526.25	591.01	1.7358
320	0.05607	548.47	615.75	1.7956	0.04798	547.97	615.14	1.7772

TABLE B.4.2 (continued)
 Superheated R-410a

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
	1800 kPa (28.22°C)				2000 kPa (32.31°C)			
Sat.	0.01376	259.38	284.15	0.9818	0.01218	259.72	284.09	0.9731
40	0.01534	272.67	300.29	1.0344	0.01321	269.07	295.49	1.0099
60	0.01754	292.34	323.92	1.1076	0.01536	289.90	320.62	1.0878
80	0.01945	310.76	345.77	1.1713	0.01717	308.88	343.22	1.1537
100	0.02119	328.84	366.98	1.2297	0.01880	327.30	364.91	1.2134
120	0.02283	346.93	388.03	1.2847	0.02032	345.64	386.29	1.2693
140	0.02441	365.24	409.17	1.3371	0.02177	364.12	407.66	1.3223
160	0.02593	383.85	430.51	1.3875	0.02317	382.86	429.20	1.3732
180	0.02741	402.82	452.16	1.4364	0.02452	401.94	450.99	1.4224
200	0.02886	422.19	474.14	1.4839	0.02585	421.40	473.10	1.4701
220	0.03029	441.97	496.49	1.5301	0.02715	441.25	495.55	1.5166
240	0.03170	462.16	519.22	1.5753	0.02844	461.50	518.37	1.5619
260	0.03309	482.77	542.34	1.6195	0.02970	482.16	541.56	1.6063
280	0.03447	503.78	565.83	1.6627	0.03095	503.21	565.12	1.6497
300	0.03584	525.19	589.70	1.7051	0.03220	524.66	589.05	1.6922
320	0.03720	546.98	613.94	1.7467	0.03343	546.49	613.35	1.7338
340	0.03855	569.15	638.54	1.7875	0.03465	568.69	637.99	1.7747
	3000 kPa (49.07°C)				4000 kPa (61.90°C)			
Sat.	0.00729	258.19	280.06	0.9303	0.00460	250.37	268.76	0.8782
60	0.00858	274.96	300.70	0.9933	—	—	—	—
80	0.01025	298.38	329.12	1.0762	0.00661	285.02	311.48	1.0028
100	0.01159	319.07	353.84	1.1443	0.00792	309.62	341.29	1.0850
120	0.01277	338.84	377.16	1.2052	0.00897	331.39	367.29	1.1529
140	0.01387	358.32	399.92	1.2617	0.00990	352.14	391.75	1.2136
160	0.01489	377.80	422.49	1.3150	0.01076	372.51	415.53	1.2698
180	0.01588	397.46	445.09	1.3661	0.01156	392.82	439.05	1.3229
200	0.01683	417.37	467.85	1.4152	0.01232	413.25	462.52	1.3736
220	0.01775	437.60	490.84	1.4628	0.01305	433.88	486.10	1.4224
240	0.01865	458.16	514.11	1.5091	0.01377	454.79	509.85	1.4696
260	0.01954	479.08	537.69	1.5541	0.01446	475.99	533.83	1.5155
280	0.02041	500.37	561.59	1.5981	0.01514	497.51	558.08	1.5601
300	0.02127	522.01	585.81	1.6411	0.01581	519.37	582.60	1.6037
320	0.02212	544.02	610.37	1.6833	0.01647	541.55	607.42	1.6462
340	0.02296	566.37	635.25	1.7245	0.01712	564.06	632.54	1.6879
360	0.02379	589.07	660.45	1.7650	0.01776	586.90	657.95	1.7286

Anexo 2 – Propiedades termodinámicas para el fluido agua con software Computer Aided Thermodynamic Tables 3

DateTime: 14/05/2022 11:03:58 a. m. Page: 1

Water

#	Temp	Pressure	Specific	Internal	Specific	Specific	Quality	Phase
	C	MPa	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg/K		
1	160	0.6178	0.3071	2568	2758	6.75		Superheated Vapor
2	100	0.6178	0.001043	418.8	419.4	1.306		Compressed Liquid

Anexo 3 – Propiedades termodinámicas para el fluido R410a con software Computer Aided Thermodynamic Tables 3

DateTime: 14/05/2022 11:13:56 a. m. Page: 1

Refrigerants								
<u>Type</u>	<u>Temp</u>	<u>Pressure</u>	<u>Specific</u>	<u>Internal</u>	<u>Specific</u>	<u>Specific</u>	<u>Quality</u>	<u>Phase</u>
	<u>C</u>	<u>MPa</u>	<u>m³/kg</u>	<u>kJ/kg</u>	<u>kJ/kg</u>	<u>kJ/kg/K</u>		
1. R-410a	61.9	4	0.004586	250.4	268.7	0.8781		Superheated Vapor
2. R-410a	140	4	0.009903	352.1	391.8	1.214		Dense Fluid (P>PC)
3. R-410a	80	0.1	0.4017	324.7	364.9	1.543		Dense Fluid (P>PC)
4. R-410a	-31.45	0.1	0.2686	246	272.8	1.231		Superheated Vapor
5. R-410a	-51.67	0.1	0.0007406	-16.16	-16.09	-0.07054		Compressed Liquid
7. R-410a	-49.55	4	0.0007392	-14.75	-11.79	-0.06419		Compressed Liquid

Anexo 4 – Ficha técnica de la turbina de vapor Siemens SST-500 de 100 MW

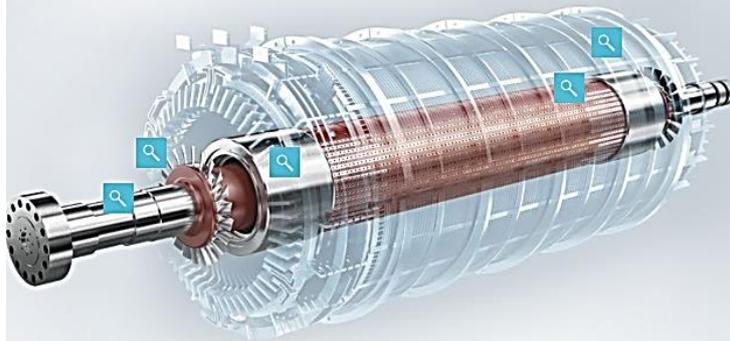
SST-500	
Power output	up to 100 MW
Speed	up to 15,000 rpm
Live steam parameters	
Inlet pressure	up to 30 bar/435 psi
Inlet temperature	up to 400°C/750°F
Exhaust steam parameters	
District Heating	up to 1.5 bar/21.75 psi
Condensing	up to 0.5 bar/7.25 psi
Steam extraction	
Uncontrolled (up to 2)	various pressure levels

Anexo 5 – Ficha técnica del generador Siemens SGen6-100A-2P de 140 MVA

Key features

Apparent power
25 to 370 MVA

up to
98.9%
efficiency



	Frequency	Apparent power	Efficiency	Designed for power factor	Terminal voltage
SGen5-100A-2P	50 Hz	25 – 370 MVA	up to 98.9%	0.80	6.3 – 20 kV
SGen6-100A-2P	60 Hz	25 – 370 MVA	up to 98.9%	0.85	6.3 – 20 kV

Robust design

Service & maintenance

- Mechanical forces from both operation and transient events, such as short circuits, are safely transmitted via welded-on spring elements from the stator core to the base frame and foundation
- The self-supporting structure of the base frame with integrated cover, machine auxiliaries and exciter set facilitates easy on-site installation
- The protective coating comes standard with corrosion class C3 and can be upgraded to C5-M
- The generators are operational in a wide variety of ambient temperature ranges from -20° C to +50° C. Extended temperature ranges can be achieved with some modifications



Siemens is using Global Vacuum Pressure Impregnation (GVPI) technology for manufacturing robust and maintenance free generator stators

Anexo 6 – Ficha técnica para el intercambiador de calor Alfa Laval CP150

Design



Superior cleaning and extended performance
End-to-end laser weld of the plates guarantees accessibility and protects against corrosion.

C-weld™



Fast and efficient flushing of fouling material
Free flow channel at the plate boundaries secures efficient removal of fouling.

SmartClean™



Advanced design for higher pressures
A high-pressure, cleanable plate pattern that increases mechanical strength to improve thermal performance.

XCore™



Qualified support at your facility
True onsite service by skilled engineers, anywhere in the world.

ALOnsite™

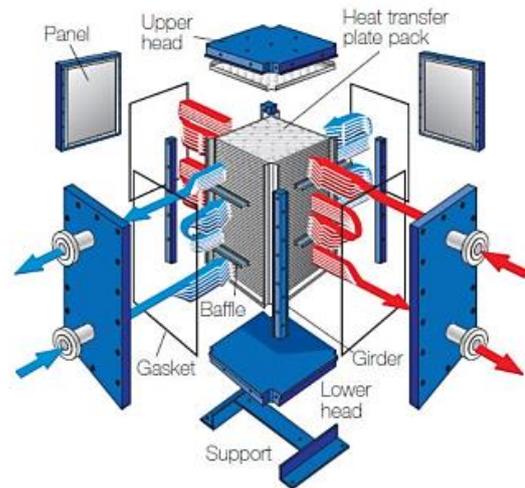
Learn more at www.alfalaval.com/compabloc

Technical data

Standard material for heat transfer plates are 316L, 254SMO, Titanium grade 1, 904L, Alloy C276 and Alloy C22. Other materials may be available on request.

Standard material for panels is carbon steel with lining in the same material as plates. Other materials (like massive stainless steel) may be available on request.

The Compabloc is available in accordance with all major international pressure vessel codes such as ASME, PED, etc...



The table below provides some inputs for our standard range. Other conditions may be available on request.

Model	Standard design pressures**	Standard design temperatures**	Max. width (in vertical position)	Max height (in vertical position)	Max. weight	Max. Heat transfer area
CP15	FV* / 30 bar (435 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	280 mm (11")	540 mm (21")	250 kg (551 lbs)	2 m ² (21 ft ²)
CP20	FV* / 30 bar (435 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	430 mm (17")	730 mm (29")	550 kg (1,212 lbs)	5 m ² (54 ft ²)
CP30	FV* / 30 bar (435 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	500 mm (20")	1070 mm (42")	1160 kg (2,557 lbs)	17 m ² (183 ft ²)
CP40	FV* / 30 bar (435 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	600 mm (24")	1400 mm (55")	2330 kg (5,136 lbs)	33 m ² (355 ft ²)
CP50	FV* / 38 bar (551 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	840 mm (33")	2050 mm (81")	5940 kg (13,095 lbs)	81 m ² (872 ft ²)
CP75	FV* / 38 bar (551 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	1240 mm (49")	3300 mm (130")	17780 kg (39,198 lbs)	320 m ² (3,444 ft ²)
CP120	FV* / 42 bar (609 psi)	-46 °C (-51 °F) / 343°C (649 °F)	2190 mm (86")	3500 mm (138")	60000 kg (132,277 lbs)	840 m ² (9,042 ft ²)

* FV = Full Vacuum

** Standard maximum design conditions for ASME design

Compabloc

A proven solution for improving sustainability

Businesses around the world have chosen Compabloc for one simple reason: it just works. Alfa Laval's proven manufacturing methods provide high reliability and a long working life in some of the toughest applications. A wide range of design benefits also enable new ways to improve your process sustainability:

- High thermal efficiency saves energy, boosts performance and reduces CO₂ emissions
- Improved heat recovery with lower costs means very short payback time
- Compact design reduces installation costs and resolves bottlenecks for increased production
- Compabloc is fully mechanically cleanable, making maintenance simpler, quicker and more cost-effective
- Durable, laser-welded construction minimizes fouling and eliminates corrosion issues

Design temperature	400°C (752°F), down to -100°C (-148°F)
Design pressure	From full vacuum to 42 barg (600 psig)
Maximum heat transfer area	840 m ² (9,985 ft ²)
Maximum liquid flow rate per unit	6,000 m ³ /h (26,250 US gpm)
Lowest achievable temperature difference	3°C (5.4°F)
Duties	Heat recovery, cooling, heating, condensation, partial condensation, reboiling, evaporation and gas cooling.
Performance	Low to high thermal length or NTU duty. Handles any corrosive medium.

For more product information, visit www.alfalaval.com/compabloc/plus

Compabloc is an unrivalled champion that stands out among other heat exchangers – including other bloc-type designs. The difference comes from unique innovations that Alfa Laval have developed based on our decades of experience in heat transfer. These features enable more reliable and efficient performance, helping you to save energy and improve your sustainability.



C-Weld™
Superior cleaning and extended performance
End-to-end laser weld of the plates guarantees accessibility and protects against corrosion.



SmartClean™
Fast and efficient flushing of fouling material
Free-flow channel at all plate boundaries secures efficient removal of fouling.



XCore™
Advanced design for higher pressures
A high-pressure, cleanable plate pattern that increases mechanical strength to improve thermal performance.



ALOnsite™
Qualified support at your facility
True onsite service by skilled engineers, anywhere in the world.



Compabloc range

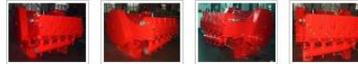
Anexo 7 – Ficha técnica de bomba

2800HP Bomba Grande-Power Quintuplex émbolo

Para 2800HP de gran potencia de la bomba de émbolo quintuplex, la BHP nominal (frenocaballos de potencia) es 2.080 KW (2.800 HP), el trazo is 203.2 mm (8 "). Además, el diámetro del émbolo es opcional desde 3-3/4 "TOS", de modo que pueda cumplir requisitos múltiples para la presión y el desplazamiento. Aunque el Bombas 2800HP son de diferentes extremos de fluidos, que están equipadas con lamismo fin de poder. Esta colocación positivo bomba de efecto simple horizontal es ampliamente utilizado en las operaciones petroleras intermitentes, como la acidificación, fractura, así matar, cementación, etc.

Parámetros

Tipo de bomba: 2800
 Max. Energía de entrada: 2088 kW
 Max. Carga de biela: 1000 kN
 Stroke Longitud: 203,2 mm
 Max. Círculo Agua específica: 330 rpm
 Relación de engranajes: 6.353: 1
 Dimensiones: 2296 × 2310 × 1198 mm
 Peso: 8.900 kg



[Inquire Now](#)

[Video](#)

[English](#) [Russian](#) [French](#) [German](#) [Arabic](#)
[Portuguese](#)

Specific Water círculo (rpm)	115		150		200		250		330	
	Émbolo Diámetro	Desplazamiento (L / min)	Presión (Mpa)	Desplazamiento (L / min)						
3-3/4 "	723	137.9	1086	103.1	1446	77.2	1809	61.8	2385	46.8
4 "	821	123.4	1234	90.4	1643	67.8	2055	54.3	2710	41.1
4-1/2 "	1041	97.5	1563	71.5	2082	53.6	2604	42.9	3437	32.5
5 "	1287	79	1930	58	2574	43	3217	35	4247	26.3

Anexo 8 – Ficha técnica para tuberías FR SCH-40



Tubos A53 /A106 API 5L/GR B SCH STD/40/XS/80/160

Tubo de acero negro sin costura, tri-norma A53 / ASTM A106 / API 5L grado B x 6 metros de largo.

Desde 1/4" a 11/2" en corte recto, y desde 2" a 24" con extremos biselados.

Esta tubería está destinada a aplicaciones mecánicas y de presión y también es aceptable para usos ordinarios en la conducción de vapor, agua, gas, y las líneas de aire.

Este tipo de tubería es apta para ser soldada y roscada. La vida útil corresponde al uso en condiciones normales para lo que fue fabricada.



TUBERÍA DE ACERO

Tolerancia Dimensional

Espesor mínimo	-12.5% del valor nominal
Peso	+/-10% del valor nominal
Diámetro	1/8" hasta 11/2": +/- 1/64"; 2" hasta 24": +/-1% del valor nominal

Propiedades Mecánicas

Resistencia a la Tracción, min	60000 PSI (415 MPa)
Fluencia, min	35000 PSI (240 MPa)

Diámetro Nominal	Dimen. Exterior	STD		SCH-40		XS		SCH-80		SCH-160	
		Espesor Nominal	Peso								
Pulg.	mm	mm	kg/m								
1/4	13.7	2.24	0.63	2.24	0.63	3.02	0.80	3.02	0.80	-	-
3/8	17.1	2.31	0.84	2.31	0.84	3.20	1.10	3.20	1.10	-	-
1/2	21.3	2.77	1.27	2.77	1.27	3.73	1.62	3.73	1.62	4.78	1.95
3/4	26.7	2.87	1.69	2.87	1.69	3.91	2.20	3.91	2.20	5.56	2.90
1	33.4	3.38	2.50	3.38	2.50	4.55	3.24	4.55	3.24	6.35	4.24
1 1/4	42.2	3.56	3.39	3.56	3.39	4.85	4.47	4.85	4.47	6.35	5.61
1 1/2	48.3	3.68	4.05	3.68	4.05	5.08	5.41	5.08	5.41	7.14	7.25
2	60.3	3.91	5.44	3.91	5.44	5.54	7.48	5.54	7.48	8.74	11.11
2 1/2	73.0	5.16	8.63	5.16	8.63	7.01	11.41	7.01	11.41	9.53	14.92
3	88.9	5.49	11.29	5.49	11.29	7.62	15.27	7.62	15.27	11.13	21.35
4	114.3	6.02	16.07	6.02	16.07	8.56	22.32	8.56	22.32	13.49	33.54
5	141.3	6.55	21.77	6.55	21.77	9.53	30.97	9.53	30.97	15.88	49.12
6	168.3	7.11	28.26	7.11	28.26	10.97	42.56	10.97	42.56	18.26	67.57
8	219.1	8.18	42.55	8.18	42.55	12.70	64.64	12.70	64.64	23.01	111.27
10	273.0	9.27	60.29	9.27	60.29	12.70	81.55	15.09	95.98	28.58	172.27
12	323.8	9.53	73.88	10.31	79.71	12.70	97.46	17.48	132.05	33.32	238.69
14	355.6	9.53	81.33	11.13	94.55	12.70	107.39	19.05	158.11	35.71	281.72
16	406.4	9.53	93.27	12.70	123.31	12.70	123.30	21.44	203.54	40.49	365.38
18	457	9.53	105.16	14.27	155.81	12.70	139.15	23.83	254.57	45.24	459.39
20	508	9.53	117.15	15.09	183.43	12.70	155.12	26.19	311.19	50.01	564.85
22	559	9.53	129.13	-	-	12.70	171.09	28.58	373.85	53.98	672.30
24	610	9.53	141.12	17.48	255.43	12.70	187.06	30.96	442.11	59.54	808.27

* Fotos y datos referenciales. No aceptamos responsabilidad por usos incorrectos o mal interpretaciones de estos datos.

Tubos A53 /A106 API 5L/GR B

Presión de Trabajo vs. Temperatura

Máxima Presión PSI												
Medida Nominal inch (mm)	Cédula		Espesor de pared (mm)	Temperature (°C)								
				-29 +38	205	260	350	370	400	430	450	
				Maximum Allowable Stress (MPa)								
				137.8	137.8	130.2	117.1	115.7	89.6	74.4	59.9	
1/4" (6)	STD	40	2.24	7985	7985	-	-	-	-	-	-	-
	XS	80	3.02	10798	10798	-	-	-	-	-	-	-
3/8" (9.6)	STD	40	2.31	6606	6606	-	-	-	-	-	-	-
	XS	80	3.20	9147	9147	-	-	-	-	-	-	-
1/2" (15)	STD	40	2.77	4992	4992	4718	4243	4193	3245	2696	2172	
	XS	80	3.73	6975	6975	6594	5929	5859	4534	3766	3034	
		160	4.78	9113	9113	8612	7746	7655	5923	4921	3964	
	XXS		7.47	14249	14249	13465	12112	11969	9262	7695	6199	
3/4" (20)	STD	40	2.87	4071	4071	3847	3461	3420	2646	2198	1771	
	XS	80	3.91	5717	5717	5402	4860	4802	3715	3087	2486	
		160	5.56	8434	8434	7971	7169	7084	5482	4554	3668	
	XXS		7.82	12054	12054	11391	10246	10125	7836	6509	5243	
1" (25)	STD	40	3.38	3807	3807	3598	3236	3198	2474	2056	1656	
	XS	80	4.55	5262	5262	4973	4476	4420	3421	2842	2289	
		160	6.35	7612	7612	7193	6470	6394	4948	4110	3311	
	XXS		9.09	11172	11172	10558	9496	9385	7262	6033	4860	
1 1/4" (32)	STD	40	3.56	3135	3135	2962	2664	2633	2038	1693	1364	
	XS	80	4.85	4377	4377	4136	3720	3676	2845	2363	1904	
		160	6.35	5888	5888	5564	5005	4946	3827	3180	2561	
	XXS		9.7	9370	9370	8854	7963	7871	6090	5059	4075	
1 1/2" (40)	STD	40	3.68	2820	2820	2665	2397	2368	1833	1530	1226	
	XS	80	5.08	3974	3974	3756	3379	3339	2583	2147	1729	
		160	7.14	5764	5764	5453	4905	4847	3750	3116	2510	
	XXS		10.16	8525	8528	8056	7247	7161	5541	4604	3708	
2" (50)	STD	40	3.91	2375	2375	2243	2020	1996	1544	1283	1033	
	XS	80	5.54	3431	3431	3242	2916	2882	2230	1853	1492	
		160	8.74	5637	5637	5327	4792	4736	3665	3044	2452	
	XXS		11.07	7367	7367	6962	6262	6189	4789	3978	3205	
2 1/2" (65)	STD	40	5.16	2598	2598	2455	2208	2183	1689	1403	1130	
	XS	80	7.01	3600	3600	3401	3060	3024	2339	1944	1566	
		160	9.53	5020	5020	4745	4267	4217	3264	2711	2184	
	XXS		14.02	7699	7699	7275	6544	6467	5004	4157	3349	
3" (80)	STD	40	5.49	2256	2256	2171	1918	1895	1466	1218	981	
	XS	80	7.62	3189	3186	3014	2711	2679	2073	1722	1387	
		160	11.13	4798	4798	4533	4077	4029	3118	2590	2087	
	XXS		15.24	6813	6813	6439	5791	5723	4429	3679	2964	
4" (100)	STD	40	6.02	1913	1913	1808	1626	1607	1243	1033	832	
	XS	80	8.56	2764	2764	2612	2349	2322	1797	1754	1202	
		120	11.13	3654	3654	3453	3105	3069	2374	1973	1595	
	XXS		17.12	5852	5852	5530	4975	4916	3804	3160	2545	
5" (125)	STD	40	6.55	1677	1677	1584	1425	1408	1089	905	731	
	XS	80	9.53	2474	2474	2338	2103	2079	1609	1336	1076	
		120	12.7	3355	3355	3170	2851	2818	2180	1812	1459	
	XXS		19.05	5206	5206	4921	4426	4374	3385	2812	2265	

Máximos de rangos de presión y temperatura de acuerdo a ASME B31.3

Tubos A53 /A106 API 5L/GR B

Presión de Trabajo vs. Temperatura

Máxima Presión PSI											
Medida Nominal inch (mm)	Cédula		Espesor de pared (mm)	Temperature (°C)							
				-29 +38	205	260	350	370	400	430	450
				Maximum Allowable Stress (MPa)							
				137.8	137.8	130.2	117.1	115.7	89.6	74.4	59.9
6" (150)	STD	40	7.11	1530	1530	1440	1294	1279	990	779	663
	XS	80	10.97	2389	2389	2258	2032	2008	1553	1290	1039
		120	14.27	3154	3154	2981	2676	2649	2051	1704	1372
	XXS	160	18.26	4108	4108	3882	3492	3450	2670	2218	1787
8" (200)		20	6.35	1035	1035	978	879	869	673	559	450
		30	7.04	1149	1149	1086	976	965	747	621	500
	STD	40	8.18	1341	1341	1267	1139	1126	871	724	584
		60	10.31	1703	1703	1609	1447	1430	1106	919	740
	XS	80	12.7	2113	2113	1997	1797	1775	1374	1141	919
		100	15.09	2531	2531	2391	2151	2126	1645	1367	1101
		120	18.26	3096	3096	2926	2632	2601	2013	1672	1347
		140	20.62	3526	3526	3332	2996	2961	2291	1904	1533
	XXS		22.23	3819	3819	3608	3247	3209	2482	2063	1662
		160	23.01	3965	3965	3747	3371	3331	2577	2141	1725
10" (250)		20	6.35	826	826	781	703	695	538	447	360
		30	7.8	1019	1019	963	866	856	663	551	444
	STD	40	9.27	1216	1216	1149	1034	1022	790	657	530
	XS	60	12.7	1682	1682	1589	1429	1412	1093	908	731
		80	15.09	2011	2011	1900	1709	1689	1307	1085	874
		100	18.26	2454	2454	2319	2087	2062	1595	1325	1067
		120	21.44	2906	2906	2746	2470	2440	1889	1569	1264
	XXS	140	25.4	3481	3481	3389	2958	2923	2262	1880	1514
		160	28.58	3949	3949	3732	3357	3318	2567	2132	1718
		20	6.35	695	695	658	591	584	452	376	303
12" (300)		30	8.38	922	922	871	783	804	600	498	401
	STD		9.53	1050	1050	992	892	882	683	568	457
		40	10.31	1139	1139	1076	968	957	727	616	496
	XS		12.7	1410	1410	1333	1199	1184	916	761	614
		60	14.27	1591	1591	1503	1352	1336	1034	859	692
		80	17.48	1962	1962	1864	1667	1648	1275	1059	853
		100	21.44	2427	2427	2294	2063	2040	1578	1311	1056
	XXS	120	25.4	2903	2903	2743	2467	2438	1887	1567	1262
		140	28.58	3290	3290	3109	2796	2763	2138	1776	1431
		160	33.32	3878	3878	3666	3297	3258	2521	2094	1687
14" (350)		10	6.35	633	633	598	538	532	411	342	275
		20	7.92	791	791	749	674	666	515	428	345
	STD	30	9.53	954	954	902	811	802	621	516	416
		40	11.13	1119	1119	1060	951	939	728	605	487
	XS		12.7	1281	1281	1211	1089	1076	832	692	558
		60	15.09	1529	1529	1445	1300	1285	994	825	666
		80	19.05	1947	1947	1840	1655	1635	1410	1051	846
		100	23.83	2458	2458	2323	2090	2066	1598	1328	1069
		120	27.79	2891	2891	2732	2457	2428	1880	1561	1258
		140	31.75	3331	3331	3148	2831	2798	2166	1799	1449
	160	35.71	3778	3778	3571	3212	3174	2456	2041	1644	

Máximos de rangos de presión y temperatura de acuerdo a ASME B31.3

Tubos A53 /A106 API 5L/GR B

Presión de Trabajo vs. Temperatura

Máxima Presión PSI											
Medida Nominal inch (mm)	Cédula	Espesor de pared (mm)	Temperature (°C)								
			-29 +38	205	260	350	370	400	430	450	
			Maximum Allowable Stress (MPa)								
			137.8	137.8	130.2	117.1	115.7	89.6	74.4	59.9	
16" (400)		10	6.35	553	553	523	470	464	359	299	241
		20	7.92	692	692	654	588	581	450	374	301
	STD	30	9.53	833	833	787	709	701	542	450	363
	XS	40	12.7	1117	1117	1056	949	938	726	598	486
		60	16.66	1476	1476	1395	1255	1240	959	797	643
		80	21.44	1916	1916	1810	1628	1609	1245	1034	833
		100	26.19	2360	2360	2230	2007	1983	1534	1274	1026
		120	30.96	2815	2815	2660	2390	2364	1830	1520	1224
		140	36.53	3355	3355	3170	2851	2818	2180	1812	1459
	160	40.49	3745	3745	3540	3184	3147	2434	2023	1630	
18" (450)		10	6.35	491	491	464	417	412	319	265	214
		20	7.92	614	614	580	522	516	399	332	267
	STD		9.53	740	740	699	629	622	481	400	322
	XS	30	11.13	865	865	818	735	728	563	468	377
			12.7	991	991	936	842	832	644	535	431
		40	14.27	1116	1116	1055	949	937	725	603	486
		60	19.05	1501	1501	1419	1276	1261	975	810	653
		80	23.83	1892	1892	1788	1608	1589	1229	1021	822
		100	29.36	2352	2352	2222	2000	1976	1529	1270	1023
	120	34.93	2823	2823	2667	2399	2371	1835	1524	1228	
	140	39.67	3232	3232	3054	2747	2714	1665	1745	1406	
	160	45.24	3718	3718	3514	3161	3123	2416	2008	1618	
20" (500)		10	6.35	441	441	417	373	371	287	238	192
	STD	20	9.53	665	665	628	565	559	432	359	289
	XS	30	12.7	890	890	841	757	748	579	481	387
		40	15.09	1061	1061	1002	901	891	690	573	462
		60	20.62	1462	1462	1381	1242	1228	950	789	636
		80	26.19	1871	1871	1768	1590	1571	1216	1010	813
		100	32.54	2345	2345	2217	1994	1970	1525	1266	1020
		120	38.1	2768	2768	2616	2353	2325	1800	1495	1204
		140	44.45	3260	3260	3081	2771	2738	2120	1761	1418
	160	50.01	3691	3691	3495	3144	3107	2404	1997	1609	
24" (600)		10	6.35	367	367	347	312	309	239	198	160
	STD	20	9.53	553	553	523	470	464	359	299	241
	XS		12.7	739	739	699	629	622	481	400	322
		30	14.27	832	832	787	707	700	542	450	362
		40	17.48	1023	1023	967	869	859	666	553	445
		60	24.61	1453	1453	1373	1235	1221	944	785	633
		80	30.96	1841	1841	1741	1564	1546	1197	994	800
		100	38.89	2335	2335	2207	1986	1967	1518	1261	1016
		120	46.02	2788	2788	2635	2369	2342	1812	1506	1213
	140	52.37	3198	3198	3022	2718	2686	2079	1727	1391	
	160	59.54	3666	3666	3465	3117	3080	2383	1980	1595	

Máximos de rangos de presión y temperatura de acuerdo a ASME B31.3

Anexo 9 – Tasas de descuento en el mundo

Institución o país	Tasa	Base conceptual o teórica
Organismos multilaterales		
Banco Mundial	10%-12%	Tasa administrativa convencional
Banco Interamericano de Desarrollo	10%-12%	Tasa administrativa convencional/ costo de oportunidad del capital
Banco Asiático de Desarrollo	10%-12%	Tasa administrativa convencional
<i>Países desarrollados</i>		
Alemania	3%	Basada en la tasa federal de refinanciamiento
Canadá	10%	Costo de oportunidad social del capital
España	6% para transporte 4% para agua	Tasa social de preferencia intertemporal
Estados Unidos, Oficina de Administración y Presupuesto	7%	Costo de oportunidad social del capital
Estados Unidos, Oficina de Presupuesto del Congreso y Oficina General de Contabilidad	Tasa de mercado de deuda del Tesoro	Tasa social de preferencia intertemporal
Estados Unidos, Agencia de Protección Ambiental	Tasa intergeneracional de descuento: 2%-3%, sujeta a análisis de sensibilidad	Tasa social de preferencia intertemporal
Francia	4%	Tasa social de preferencia intertemporal
Noruega	3,5%	Tasa de crédito gubernamental en términos reales
Reino Unido	3,5% Para proyectos superiores a 30 años tasas diferenciadas menores	Tasa social de preferencia intertemporal
Países en desarrollo		
China	8% para proyectos de corto y mediano plazo; menor que 8% para proyectos de largo plazo	Promedio ponderado de la tasa social de preferencia intertemporal y la tasa basada en el costo de oportunidad social del capital (método de Harberger)
India	12%	Costo de oportunidad social del capital
Pakistán	12%	Costo de oportunidad social del capital
<i>Países de América Latina</i>		
Chile	6%	Promedio ponderado de la tasa social de preferencia intertemporal y la tasa basada en el costo de oportunidad social del capital (método de Harberger)
Colombia	12%	Equivale a la rentabilidad mínima esperada por el inversionista
México	10% antes de 2014: 12%	Promedio ponderado de la tasa social de preferencia intertemporal y la tasa basada en el costo de oportunidad social del capital (método de Harberger)
Perú	9% antes de 2012: 10%	Promedio ponderado de la tasa social de preferencia intertemporal y la tasa basada en el costo de oportunidad social del capital (método de Harberger)

Fuente: J. Campos, T. Serebrisky y A. Suárez-Alemán, *Tasa de descuento social y evaluación de proyectos: algunas reflexiones prácticas para América Latina y el Caribe*, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2016; J. Zhuang y otros, "Theory and practice in the choice of social discount rate for cost-benefit analysis: a survey", *ERD Working Paper*, N° 94, Banco Asiático de Desarrollo, 2007; E. Aldunate y R. Martner, "Política fiscal y protección social", *Revista de la CEPAL*, N° 90 (LC/G.2323-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2006; Chile: Sistema Nacional de Inversiones (SNI) del Ministerio de Desarrollo Social; Colombia: Sistema Nacional de Inversión Pública del Departamento Nacional de Planeación; México: Sistema de Inversión Pública (SIP) de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público; Perú: Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) de la Dirección General de Inversión Pública del Ministerio de Economía y Finanzas.