



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**MECÁNICA ELÉCTRICA**

**Propuesta de mitigación de impacto ambiental mediante el  
diseño de una central geotérmica en el campo geotérmico  
Ancocollo, Tacna**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**Ingeniero Mecánico Electricista**

**AUTOR:**

Montenegro Guerrero, Irvin Ivan ([orcid.org/0000-0003-4925-0273](https://orcid.org/0000-0003-4925-0273))

Prada Huaman, Rafael Edgar ([orcid.org/0000-0002-6418-8546](https://orcid.org/0000-0002-6418-8546))

**ASESOR:**

Dr. Salazar Mendoza, Aníbal Jesús ([orcid.org/0000-0003-4412-8789](https://orcid.org/0000-0003-4412-8789))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, Transmisión y Distribución

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

CHICLAYO – PERÚ

2023

## **Dedicatoria**

*A mi ángel en el cielo, mi madre Elva, quien fue mi mayor motivación en esta trayectoria universitaria, el cual hace mucho tiempo atrás me enseñó que con paciencia, perseverancia y lealtad se pueden lograr grandes cosas en la vida.*

*A mi Padre Rafael, a mi novia Marjorie, mis hijos Xiomara y Uriel que siempre están pendientes de los resultados, así que este logro es para ellos.*

***Rafael Edgar Prada Huamán***

*A Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora. Por brindarme los medios necesarios para continuar mi formación académica, siendo un apoyo incondicional para lograrlo ya que sin él no hubiera podido lograrlo.*

*A cada uno de los que son parte de mi familia que me acompañaron a lo largo del camino, brindándome la fuerza necesaria para continuar y ayudándome en lo que fuera posible, dándome consejos y orientación. Quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositándome su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora. Los amo con toda mi vida.*

***Iván Irvin Montenegro Guerrero***

## **Agradecimiento**

*Agradezco a mi novia Marjorie por el apoyo y amor incondicional ya que sin ella nada de esto hubiera sido posible, la amo con todo mi corazón, gracias por ser mi fortaleza y no dejar que desmorone ante las adversidades.*

*A mis amigos y compañeros de trabajo Albino y Edis por brindarme sus consejos y apoyo en los momentos más difíciles.*

*A mi mejor amigo y compañero de prácticas Irvin por su sincera amistad, por su confianza hacia a mí y por su dedicación y responsabilidad al realizar el presente estudio.*

*A mi docente universitario que con su paciencia y dedicación me brinda sus conocimientos que son fundamentales para perfeccionar esta etapa con éxito.*

### ***Rafael Edgar Prada Huamán***

*Agradezco al ser supremo, divino y fiel que es Dios por darme la vida, sabiduría e inteligencia, vigor y oportunidades para cumplir mis anhelos, junto a mis padres que en momentos buenos y malos siempre me han dado lo requerido y alientan a seguir adelante para llegar a ser un buen profesional en la vida.*

*A todos los docentes que me brindaron su apoyo desinteresado para la realización del presente proyecto de investigación. A mis compañeros con los cuales pasamos momentos buenos y malos y de su apoyo incondicional a las personas quienes me ayudaron a cumplir este trabajo.*

### ***Iván Irvin Montenegro Guerrero***

## Índice de contenidos

Carátula .....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras .....	vii
Resumen .....	viii
Abstract.....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	5
III. METODOLOGÍA.....	19
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	19
3.2. Variables y operacionalización .....	19
3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis.....	19
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	20
3.5. Procedimientos.....	20
3.6. Método de análisis de datos .....	21
3.7. Aspectos éticos.....	22
IV. RESULTADOS .....	23
4.1. Elección del fluido para el ciclo orgánico Rankine .....	23
4.2. Parámetros considerados para evaluación termodinámica del ORC .....	38
4.3. Eficiencia e índice de contaminación ambiental .....	47
4.3.1. Eficiencia teórica y real para la central geotérmica.....	47
4.3.2. Índice de contaminación ambiental para la central geotérmica .....	48
4.4. Diseño de la central geotérmica .....	49
4.4.1. Equipamiento de central geotérmica .....	49
4.5. Análisis económico financiero.....	51
V. DISCUSIÓN .....	60
VI. CONCLUSIONES.....	64
VII. RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS .....	66
ANEXOS .....	74

## Índice de tablas

Tabla 1. Diferentes fluidos de trabajo empleados en ORC.....	35
Tabla 2. Características de los diferentes fluidos de trabajo para ORC .....	36
Tabla 3. Razones para matriz ponderada .....	37
Tabla 4. Parámetros considerados para matriz de ponderada.....	37
Tabla 5. Matriz ponderada para seleccionar el fluido orgánico de trabajo.....	37
Tabla 6. Potencial posible de desarrollo para distintos campos geotérmicos.....	38
Tabla 7. Parámetros para calcular la temperatura del estado 1 .....	40
Tabla 8. Parámetros para calcular la entropía en el estado 1 .....	40
Tabla 9. Parámetros para calcular la entalpía en el estado 1.....	40
Tabla 10. Parámetros para calcular el volumen específico en el estado 1.....	41
Tabla 11. Parámetros para calcular la temperatura en el estado 2 .....	42
Tabla 12. Parámetros para calcular la temperatura 2r .....	43
Tabla 13. Resumen de análisis termodinámico .....	47
Tabla 14. Gastos de exploración (Miles de dólares) .....	52
Tabla 15. Gastos por ejecución de pozos y vapoductos (Miles de dólares).....	52
Tabla 16. Gastos para la central de producción eléctrica (Miles de dólares) .....	52
Tabla 17. Gastos por transmisión (Miles de dólares) .....	53
Tabla 18. Gastos de subproyectos (Miles de dólares) .....	53
Tabla 19. Resumen de los Gastos de Inversión (Miles de dólares) .....	53
Tabla 20. Gastos de O&M (Miles de dólares).....	54
Tabla 21. Gastos de permisos (Miles de dólares) .....	54
Tabla 22. Ventas de energía (base) .....	55
Tabla 23. Ventas de energía (media punta) .....	55
Tabla 24. Ventas de potencia (base).....	56
Tabla 25. Ventas de potencia (media punta).....	56

Tabla 26. Análisis de rentabilidad de la planta geotérmica propuesta (despacho base) .....	57
Tabla 27. Análisis de rentabilidad de la planta geotérmica propuesta (despacho media punta) .....	58
Tabla 28. Indicadores de rentabilidad (base) .....	59
Tabla 29. Indicadores de rentabilidad (media punta) .....	59

## Índice de gráficos y figuras

Figura 1. Diferentes clases de energías empleadas a nivel mundial.....	11
Figura 2. Composición del interior del planeta Tierra .....	12
Figura 3. Principales componentes de un yacimiento geotérmico.....	13
Figura 4. Costo nivelado de la energía geotérmica a nivel mundial .....	13
Figura 5. Mapa del potencial de energía geotérmica en Perú .....	15
Figura 6. Configuración de un Ciclo Rankine ideal y su diagrama termodinámico T-s .....	16
Figura 7. Configuración de un Ciclo Rankine binario .....	17
Figura 8. Gas refrigerante R12.....	24
Figura 9. Curva entalpía vs Presión para el R12 (Diagrama Mollier) .....	25
Figura 10. Gas refrigerante R134a.....	27
Figura 11. Diagrama Mollier del refrigerante R134a.....	28
Figura 12. Refrigerante R410a .....	30
Figura 13. Diagrama de Mollier para refrigerante R410a .....	31
Figura 14. Refrigerante R600a .....	32
Figura 15. Diagrama de Mollier para el refrigerante R600a.....	33
Figura 16. Refrigerante R601a .....	34
Figura 17. Esquema termodinámico para la central geotérmica propuesta.....	39
Figura 18. Esquema del intercambiador de calor .....	44
Figura 19. Esquema del intercambiador de calor .....	46

## Resumen

En el presente estudio se propuso como objetivo general determinar el porcentaje de mitigación del impacto ambiental empleando una central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo, en el departamento de Tacna. El tipo de investigación fue aplicada, con un diseño de investigación no experimental del tipo explicativo. La población de estudio fueron los campos geotérmicos en el área nacional y la muestra fue el campo geotérmico Ancocollo. De los resultados se concluyó que, del análisis comparativo entre los fluidos orgánicos de trabajo seleccionados, el que posee las mejores propiedades y es ecoamigable con el medio ambiente y tiene un poder calorífico elevado es el refrigerante R410a, donde la tabla de propiedades termodinámicas se aprecia en el Anexo1. El flujo de masa del refrigerante R410a fue de 782.75 kg/s para generar la potencia requerida que fue de 90 MW en el Ciclo Orgánico Rankine, y el flujo de masa del fluido geotérmico fue de 448.11 kg/s para cumplir con los requerimientos energéticos en el intercambiador de calor. La eficiencia térmica teórica del Ciclo Orgánico Rankine calculada fue de 30.72% y la eficiencia térmica real fue de 27.41%, y esta disminución se debe a que se tuvieron en cuenta las eficiencias isoentrópicas de la bomba y turbina; y el índice de contaminación de la central geotérmica es de 13 955 toneladas de dióxido de carbono. La inversión total para la central geotérmica fue de \$ 101 999 200.00 y del análisis de rentabilidad para despacho en base se obtuvo un Valor Actual Neto de \$ 160 685 424.00, una Tasa Interna de Retorno de 32.11% y un Payback de 3.53 años, demostrando que el proyecto de una central geotérmica es viable y rentable económicamente.

**Palabras clave:** Energía geotérmica, rentabilidad, impacto ambiental, ciclo orgánico Rankine.



## **Abstract**

In the present study, the general objective was to determine the percentage of mitigation of environmental impact using a geothermal power plant in the Ancocollo geothermal field, in the department of Tacna. The type of research was applied, with a non-experimental research design of the explanatory type. The study population was the geothermal fields in the national area and the sample was the Ancocollo geothermal field. From the results it was concluded that, from the comparative analysis between the selected organic working fluids, the one that has the best properties and is eco-friendly with the environment and has a high calorific value is the refrigerant R410a, where the table of thermodynamic properties can be seen. in Annex 1. The mass flow of the refrigerant R410a was 782.75 kg/s to generate the required power, which was 90 MW in the Rankine Organic Cycle, and the mass flow of the geothermal fluid was 448.11 kg/s to meet the energy requirements in the heat exchanger. The theoretical thermal efficiency of the Rankine Organic Cycle calculated was 30.72% and the real thermal efficiency was 27.41%, and this decrease is due to the fact that the isentropic efficiencies of the pump and turbine were taken into account; and the pollution index of the geothermal power plant is 13,955 tons of carbon dioxide. The total investment for the geothermal power plant was \$101,999,200.00 and from the profitability analysis for base dispatch, a Net Present Value of \$160,685,424.00 was obtained, an Internal Rate of Return of 32.11% and a Payback of 3.53 years, demonstrating that the project of a geothermal power plant is viable and economically profitable.

**Keywords:** Geothermal energy, profitability, environmental impact, Rankine organic cycle.

## I. INTRODUCCIÓN

Países desarrollados han empleado la energía geotérmica y está ha ido en aumento, demostrando poseer una excelente tendencia positiva a lo largo del tiempo. Por ejemplo, la potencia instalada de dichas centrales geotérmicas aumento de 75 a 462 MWe entre los años 1975 y 1979; y en 1984 se tenía una capacidad que superaba una potencia de 1 GWe (Saunders, 2018; Matuszewska et al., 2019; Colucci et al., 2021). Adicionalmente, México tiene una potencia instalada de 990 MW, El Salvador posee 204 MW, Guatemala tiene 52 MW, Costa Rica cuenta con 200 MW y Nicaragua cuenta con 123 MW (Michea et al., 2019). Como dato adicional, Islandia emplea a la energía geotérmica como una de sus fuentes importantes, donde el 25% de la demanda de electricidad es suministrada por dicho tipo de energía y en calefacción abarca casi la totalidad del suministro. La central geotérmica Theistareykir con capacidad de 90 MW, en 2018 empezó sus operaciones y sigue operando actualmente (Kjeld et al., 2022); e Indonesia cuenta con un gran potencial geotérmico, y buscan desarrollarla ya que es una energía sostenible y renovable, donde su potencial es de 28,91 GW, ocupando el segundo lugar como el país con la reserva más grande en el mundo y solo 1,699 GW se ha aprovechado representando el 5.9% del potencial geotérmico (Muslihudin et al., 2022; Bina et al., 2018) y la huella de carbono para la central Theistareykir es de 6 y 79 g  $CO_2$  eq/kWh con una mediana de 38 g  $CO_2$  eq/kWh, siendo similar a la central eléctrica Hellisheidi, que usa un ciclo combinado de calor en el Sur de Islandia (Karlsdottir et al., 2020). La Unión Europea (UE) está trabajando para lograr evaluar los ciclos de vida para las centrales geotérmicas (Parisi et al., 2020).

Colombia posee un potencial geotérmico promedio de 1170,2 MWe (Alfaro et al., 2021). En Ischia, Ceglia et al. (2021) en el sistema que propusieron permitió evitar 29,9 t/año de  $CO_2$  en emisiones y ahorrar 119,9 MWh/año de energía primaria en relación al sistema tradicional. Tranamil t al. (2022) en su Evaluación de la hibridación de una Planta Geotérmica existente mediante el acoplamiento de un sistema de CSP, lograron determinar un aumento de la oferta térmica. En promedio, el vapor generado aumenta en 3,44 kg/s cuando se acoplan 10 MW de capacidad termosolar al sistema geotérmico.

DiPippo (2022) concluyó que la central Pathé fue un logro grande para el uso de

recursos geotérmicos mexicanos pudiendo ser explotados técnica y económicamente para producir electricidad en beneficio del país.

Barasa & Akanni (2022) determinaron que una central geotérmica posee índices superiores en relación a centrales térmicas, como un mejor factor de capacidad, factor de carga, costo unitario de generación, etcétera. Zuffi et al. (2022) determinaron que el desempeño ambiental de centrales geotérmicas es variable para cada lugar, tamaño y tecnología empleada, pero que pueden ser comparados con otras tecnologías de energía renovable.

Oyekale & Emagbetere (2022) manifestaron que la evaluación exergoambiental debe fusionar el LCA convencional con el análisis exergético, y las definiciones de las métricas de desempeño más significativas.

Fiaschi et al. (2021), mencionan que el enfoque de PSA para un sistema CHP, con referencia específica a los sistemas de energía geotérmica, permite una comparación generalizada entre contextos regionales bastante diferentes. El PES es un medidor de comparación más correcto para los sistemas CHP (que van desde el 100 % de electricidad hasta el 100 % de calor) cuando se adopta para evaluar los beneficios del uso directo del calor. Además, es un indicador aceptado para sistemas que producen calor y electricidad (Marty et al., 2019).

En el Perú, el 57,3% de la demanda de electricidad es suministrada por centrales hidroeléctricas, el 38,4% por centrales térmicas y el 4,3% restante por centrales eólicas y solares (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

Qurrahman et al. (2021) realizaron un análisis de energía y exergía para una central geotérmica ubicada en Dieng, donde lograron determinar que la turbina era la que representaba la mayor pérdida de calor y es conveniente ya que en esencia es la encargada de generar la potencia requerida.

Moya et al. (2018); Paulillo et al. (2019) y Ball (2021) mencionan que la transición respecto al actual sistema energético basado en combustibles del tipo fósil en un sistema más ecológico se necesita de tecnologías que sean de energías renovables. Sin embargo, la energía del tipo geotérmica tiene sus desafíos propios en relación con otro tipo de tecnología renovable, pero que ha logrado demostrar un enorme potencial para disminuir los efectos de contaminación.

De acuerdo con Günther (2018), las centrales geotérmicas pueden producir energía

de forma estable dependiendo de la potencia instalada de la central.

Nasruddin et al. (2018) informa que el Ciclo Rankine Orgánico (ORC) por sus siglas en inglés, tiene una de las mejores eficiencias exergéticas, con aproximadamente de 82,12%.

Millstein et al. (2021) indican que la generación geotérmica podría aumentar aún con operaciones flexibles, pudiendo pasar de \$2 a \$4/MWh, de acuerdo a la cantidad y tipo de reducción y mejora permitida.

La pregunta general en la presente investigación fue ¿en qué porcentaje se podría mitigar el impacto ambiental empleando una central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo, en el departamento de Tacna? Y las preguntas específicas planteadas fueron: ¿Cuál será el fluido orgánico de trabajo que permita aprovechar el potencial del campo geotérmico Ancocollo?, ¿Cuál será el flujo másico para el fluido orgánico de trabajo y geotérmico en el Ciclo Rankine Orgánico?, ¿Cuál será la eficiencia y el índice de contaminación para la central geotérmica? Y ¿será viable económica y financieramente el proyecto de una central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo?

Por lo tanto, el objetivo general fue: Determinar el porcentaje de mitigación del impacto ambiental empleando una central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo, en el departamento de Tacna.

Además, se plantearon como objetivos específicos:

1. Seleccionar el adecuado fluido orgánico de trabajo que permita aprovechar el potencial del campo geotérmico Ancocollo.
2. Calcular el flujo de masa para el fluido de trabajo y geotérmico para el Ciclo Rankine Orgánico.
3. Determinar la eficiencia térmica teórica y real para la central geotérmica y calcular el índice de contaminación de la central geotérmica.
4. Realizar el diseño de la central geotérmica mediante la selección de los componentes adecuados para optimizar la generación de energía eléctrica.
5. Determinar la viabilidad económica financiera de la central geotérmica.

La hipótesis planteada fue: la mitigación del impacto ambiental es positiva al emplear una central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo, en el departamento de Tacna.

Respecto a la justificación técnica, la actual investigación sirvió para determinar la factibilidad técnica de implementar una central geotérmica, y en el ámbito académico sirvió como guía y antecedente para futuras investigaciones referente al tema investigado.

Se puede justificar económica y financieramente ya que como todo proyecto deja utilidades para aquellos que estén involucrados en su realización como inversionistas, esto debido a la venta de energía producida y venta de potencia a los precios en barra establecidos por OSINERGMIN siendo inyectados al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Se justifica en el ámbito ambiental que permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al no emplearse combustibles fósiles para generar electricidad, sino que el mismo fluido geotérmico será la fuente de calor para el Ciclo Orgánico Rankine de potencia.

Y finalmente, en el ámbito social se justifica porque la energía generada sirvió para aquellas localidades que no cuentan con acceso a un suministro eléctrico adecuado, lo cual genera un avance importante ya que dichas localidades pueden utilizar diferentes tecnologías en los diferentes sectores productivos, adicionalmente, aumenta la calidad de vida de la población ya que obtienen servicios básicos que necesitan de energía eléctrica para funcionar.

## II. MARCO TEÓRICO

### Antecedentes del problema

En Indonesia, Muslihudin et al. (2022) elaboraron su artículo de investigación referente a las restricciones ambientales que se presentan en la construcción de una central geotérmica sustentable en las laderas del monte Slamet, en Java Central. Indonesia es uno de los países con un gran potencial geotérmico. Se busca desarrollarla para poder aprovechar dicho potencial ya que se considera como una energía sustentable y renovable. El potencial de energía geotérmica del país es de 28.910 MW, logrando colocarse en el segundo lugar de los países con dicho tipo de energía. Hasta el momento solo 1.699 MW de capacidad instalada o el 5,9% de su potencial geotérmico. El propósito de este estudio es describir cómo el proceso de ejecución de una central de energía geotérmica sostenible en las laderas del Monte Slamet no ha tenido éxito. El método de estudio utilizado es cualitativo con técnicas de entrevista, observación y documentación en la recolección de datos. El método para analizar datos fue el interactivo. Los resultados del estudio muestran que el proceso de construcción de plantas de energía geotérmica en Slamet Mount comenzó en realidad desde 2005. El plan inicial era que en 2021 podría explotarse con 220 megavatios de electricidad. De hecho, aún no está terminado. Una de estas limitaciones es causada por factores ambientales que incluyen componentes abióticos, bióticos y sociales. Componentes abióticos en forma de aspectos geológicos y condiciones extremas del suelo que provocan la contaminación del agua. El componente biótico son los sectores pesquero y agrícola de la población afectados por la turbidez del agua. El componente social es el descontento público, lo que resulta en manifestaciones contra el proceso de desarrollo de la planta de energía geotérmica sostenible.

En el artículo elaborado por Oyekale & Emagbetere (2022), donde realizaron una revisión sobre las evaluaciones en el ciclo de vida exergético y convencional de las centrales geotérmicas que emplean Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que explotan los recursos geotérmicos a baja temperatura. La importancia de las plantas de ciclo orgánico de Rankine (ORC) para el desarrollo de la futura infraestructura energética es ampliamente reconocida, debido en gran parte a su capacidad para explotar fuentes de energía térmica de baja temperatura, como el calor residual industrial y

los recursos de energía renovable. En este sentido, en la literatura se están proponiendo diferentes esquemas para el desarrollo técnico y económico de las plantas ORC. Además, las evaluaciones de viabilidad ambiental de los sistemas de energía basados en ORC han ido ganando atención gradualmente recientemente, pero en relación con los aspectos técnicos y económicos, el estudio respecto al análisis del ciclo de vida (LCA) sobre ORC aún están en proceso inicial.

Zuffi et al. (2022) manifiestan que la geotermia es una energía renovable muy prometedora que, a diferencia de las energías renovables variables, es independiente de las condiciones externas/climáticas y puede cubrir tanto la demanda de energía como la de calor. No obstante, a pesar de estas características ventajosas, las plantas de energía geotérmica tradicionales pueden tener impactos ambientales no despreciables: estos van desde emisiones de contaminantes o gases de efecto invernadero hasta el uso relevante de productos químicos, energía y otros recursos durante el desarrollo de la central (pozos), operación y ejecución. Por esta razón, se seleccionó el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) como la herramienta adecuada para realizar la comparación. Se realizó un análisis actualizado de varios casos de referencia representativos de plantas de energía geotérmica de diferentes tipos y tamaños utilizando el método de evaluación de huella ambiental del producto EF 2.0. Esto también representa una actualización sobre la práctica actual documentada en la literatura técnica, que a menudo aplica diferentes métodos (por ejemplo, RECIPE, ILCD, CML o Eco-Indicator) que están siendo reemplazados.

En Chile, en el artículo que elaboraron Tranamil et al. (2022) respecto a la evaluación sobre hibridación de una central geotérmica existente acoplando un sistema CSP para aumentar la producción de energía, mencionaron que la energía solar concentrada (CSP) y los sistemas de energía geotérmica se describen como dos de las tecnologías más prometedoras para la generación de electricidad sostenible y confiable. Varios estudios en la literatura técnica han señalado que la hibridación de las fuentes de energía solar y geotérmica podría conducir a una reducción del costo nivelado de energía (LCOE) de los sistemas geotérmicos, así como a mejorar el factor de capacidad de los sistemas CSP. Sin embargo, la literatura técnica muestra que la integración de colectores solares térmicos no

presenta un impacto positivo en todos los escenarios analizados. El presente estudio tiene como objetivo profundizar en el análisis de la competitividad de la hibridación de sistemas solares y geotérmicos bajo condiciones de alta irradiación como las observadas en la región andina del norte de Chile. La evaluación se llevó a cabo acoplando un modelo termodinámico en Engineering Equation Solver (EES) con un modelo solar térmico en System Advisor Model (SAM). La evaluación considera la configuración de una planta geotérmica existente, considerando las restricciones de diseño asociadas con las condiciones operativas reales de la planta. El análisis se basa en una evaluación de energía y exergía, lo que nos permite identificar la eficiencia de los subsistemas introducidos para la hibridación y evaluar la competitividad de los esquemas híbridos mediante una evaluación económica en términos de LCOE. Los resultados muestran que los esquemas híbridos permiten una reducción del LCOE de una planta geotérmica autónoma en alrededor de 10 USD/MWh, aumentando la competitividad del sistema geotérmico. Sin embargo, se observa una gran variación en dicha reducción dependiendo del tamaño del campo solar y del tanque de almacenamiento del sistema solar.

En Italia, Ceglia et al. (2021) elaboraron un artículo referente a una central geotérmica para microtrigeneración para una comunidad de energía inteligente, en la localidad de Ischia. Las mejoras para la sostenibilidad de las islas sujetas a fuertes presiones antropogénicas podrían obtenerse mediante soluciones innovadoras para el suministro de energía mediante el uso de fuentes locales de energía renovable. Este artículo analiza los posibles beneficios de una comunidad de energía geotérmica, compuesta por usuarios residenciales, ubicada en Ischia, una isla de Nápoles en el sur de Italia. El sistema propuesto se basa principalmente en una planta de Ciclo Orgánico de Rankine interactuando con una fuente geotérmica de temperatura media. Este sistema satisface tanto la carga eléctrica pura de la comunidad como las demandas de electricidad de las bombas de calor eléctricas para acondicionamiento de espacios y demandas de agua caliente sanitaria. Todo el sistema y los usuarios residenciales fueron modelados y simulados dinámicamente considerando la variación horaria de las cargas eléctricas, térmicas/refrescantes y de agua caliente sanitaria durante tres días de referencia para invierno, verano y temporada intermedia. La planta propuesta se comparó con un sistema tradicional en el que la electricidad para satisfacer las



cargas eléctricas de la comunidad total se toma de la red eléctrica nacional. Los resultados destacan que el uso del sistema propuesto en lugar del tradicional permite evitar 29,9 toneladas por año de emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, este sistema propuesto garantiza el funcionamiento insular de la comunidad explotando la fuente local de energía renovable y mejorando la independencia energética.

En Italia, Basosi et al. (2020) llevaron a cabo un estudio para evaluar el rendimiento ambiental de 3 plantas eléctricas que emplea distintas energías renovables (solar, geotérmica y eólica). Para elaborar los inventarios del ciclo de vida útil se empleó data del tipo primaria. Al analizar, se obtuvo como resultado que tienen como característica un extenso portafolio en relación a los indicadores medioambientales utilizando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ y ReCiPe 2016. Además, se demostró que tenían un perfil bueno sobre lo ecológico de las centrales geotérmicas en relación con diferentes centrales de energía tipo renovable y definitivamente una mejora en los avances sobre la matriz energética. Respecto al puntaje Eco Point, se determinó que la energía eólica era la tecnología más sustentable, con 0.0012 Ecopuntos/kWh, y la energía geotérmica, obtuvo un puntaje de 0.0177 Ecopuntos/kWh y para una central fotovoltaica, que obtuvo 0.0087 Ecopuntos/kWh, donde todos los puntaje están por debajo del mix energético nacional, que fue de 0.1240 Ecopuntos/kWh.

Nuevamente, en Italia, Sbrana et al. (2021) desarrollaron su artículo donde indican la importancia que empieza a tener la fuente de energía geotérmica, con una producción eléctrica anual de 6,18 TWh. El futuro de la energía geotérmica tiene que ver con la claridad sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de las plantas de electricidad y los contextos geológicos donde el CO<sub>2</sub> se produce de forma natural. El área volcánico-geotérmica del Monte Amiata (AVGA) es un laboratorio natural formidable para investigar los roles relativos de la desgasificación natural de CO<sub>2</sub> y las emisiones de CO<sub>2</sub> de las plantas de energía geotérmica (GPP). Esta investigación se basa en medir el flujo de gas del suelo en el AVGA y comparar las emisiones difusas de gas del suelo volcánico con las emisiones de los campos geotérmicos en operación. El flujo natural de gas del suelo es alto, independientemente de la ocurrencia de GPP en el área, y el presupuesto para el flujo de gas natural difuso es alto con respecto a las emisiones de gas de la planta

de energía. Además, el CO<sub>2</sub> emitido por las centrales eléctricas parece reducir la cantidad de emisiones naturales debido al flujo de gas operado por las centrales eléctricas. Durante el ciclo de vida de los GPP, las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se reducen aún más debido a la reinyección de fluidos acuosos libres de gas en los reservorios geotérmicos. Por lo tanto, los GPP actualmente en funcionamiento en AVGA producen energía a un nivel de cero emisiones.

Quispe Huayta (2021) en su investigación propuso como objetivo diseñar una planta geotérmica de ciclo binario, empleando un Ciclo Rankine Orgánico (ORC), aprovechando las aguas termales de la ciudad mencionada. Proponiendo reducir los efectos contaminantes hacia el ambiente, mejorando la matriz de transición de energía del Perú, además de satisfacer y brindar electricidad limpia al sistema eléctrico. Se utilizó el tipo de investigación aplicada y descriptiva, haciendo uso de los conceptos, teorías respecto a al diseño de centrales térmicas para poder responder a los objetivos que se plantearon. Los resultados obtenidos del análisis, indicaron que se empleó el Isobutano como fluido de trabajo, por sus excelente propiedades físicas y termodinámicas. El flujo de masa para el Isobutano fue de 238928.40 kg/h y para el flujo geotérmico de 583578 kg/h. La central tuvo una generación de 1 500 kW, y una eficiencia de la central de 5.623%.

En referencia al estudio de Curi (2021), menciona conceptualmente que existen 3 tecnologías para producir energía eléctrica con energía geotérmica. Planteó como objetivo buscar información respecto a las alternativas que podrían dar una respuesta respecto al déficit de producción sustentable que se desarrollará en el sur del Perú hacia el 2024 (Escena pre-Covid). Se tomaron tres tipos de plantas geotérmicas para producción de energía eléctrica, una de destello simple, otra de ciclo binario y de boca de pozo. Concluyendo que Tacna posee un enorme potencial respecto a la geotermia, pudiendo ser usado para lograr la satisfacción del déficit de energía eléctrica. Donde las plantas de boca de pozo y de destello simple poseen un costo relativamente bajo para su implementación.

Por otro lado, Gutierrez y Quispe (2018) en su tesis planteron como objetivo evaluar el potencial geotérmico en el campo de Paucarcolla. Donde planteó calcular el área necesaria del terreno con el fin de obtener una temperatura correcta para el buen funcionamiento de la central. También, analizar si era recomendable emplear dicha

energía para viviendas. Se concluyó que el campo geotérmico de Paucarcolla posee un potencial de energía geotérmica, a 2 m de profundidad, con 12.6°C de mínima temperatura, 14°C de máxima temperatura y 13.41°C de temperatura media. Se logró obtener una potencia de 8300 W para confort térmico, empleando tubos Slinky en instalación horizontal, con 694 m de distancia, con 150 m<sup>2</sup> de terreno. Finalmente, el coeficiente de performance (COP) fue de 4.5 a 6 y que la instalación vertical no era recomendable debido a su alto costo porque se debía perforar una profundidad de más de 15 m.

En el ámbito local, en la investigación realizada por Bulnes Jiménez (2018) planteó como objetivo diseñar una planta geotérmica utilizando un ciclo binario de potencia ORC, teniendo como objetivo el aprovechamiento de la energía proveniente del campo geotérmico en estudio con media entalpía. Se propuso una reducción de los efectos contaminantes y un aumento respecto a la demanda de corriente eléctrica donde se hizo uso de un informe sobre la energía geotérmica disponible en el departamento de Moquegua, donde se propuso generar corriente eléctrica empleando un Ciclo ORC. El tipo de investigación empleada fue aplicada y descriptiva, porque se empleó las teorías y leyes respecto a las centrales de energía geotérmica para lograr el correcto diseño de la central propuesta. Se calculó una potencia de generación de 4500 kW<sub>e</sub>. El fluido empleado fue el Isobutano, donde el flujo másico del mismo fue de 363960 kg/h. La inversión calculada fue de S/. 56 000 000, donde las ventas de energía generarán un ingreso de S/. 17 416 020 anuales. El análisis de rentabilidad arrojó un VAN de S/. 60 694 413, una TIR de 12%, lo que demostró su buena rentabilidad, siendo atractivo para invertir y con una factibilidad alta.

### **Recursos Energéticos Renovables**

Este tipo de recurso ocupa una amplia categoría de múltiples tecnologías. Explicándose, en que logran producir y brindar electricidad, energía mecánica y térmica, hasta con la característica de generar combustibles que pueden ser empleados para una gran cantidad de aplicaciones. Este tipo de tecnologías se pueden utilizar de manera desconcentrada en zonas urbanas y hasta rurales, pero, existen otro tipo que sirven para suministrar energía a sistemas eléctricos de grandes dimensiones, de manera concentrada (Grupo Intergubernamental de

expertos sobre el cambio climático, 2016).

Sin embargo, al participar múltiples fuentes energéticas renovables, teniendo a la energía fotovoltaica, eólica, mareomotriz, entre otras; logrando que gran parte de los indicadores de criticidad elevada de las unidades energéticas logren participar de la máxima demanda (Zhou et al., 2016).

Conceptualmente, la geotérmica es el calor que se obtiene de la Tierra, enfatizando al subsuelo. Donde la mezcla bifásica de vapor y líquido saturado transfieren el calor de manera directa al lugar donde será empleada. Dicha energía debe ser empleada considerando ciertos criterios, aunque puede ser usada para climatización y sistemas de refrigeración, y además de poder obtener energía eléctrica sustentable y limpia. Aunque, para la producción de corriente eléctrica es necesario que tenga una entalpía de media o alta temperatura, donde este tipo de campos se ubican cercanos a zonas con elevada actividad tectónica (IRENA, 2021).



Figura 1. *Diferentes clases de energías empleadas a nivel mundial*

Fuente: (Michea et al., 2019)

## **Energía Geotérmica**

Se dice del calor contenido adentro del planeta Tierra, el mismo que puede ser aprovechado. Esto es, que existe energía térmica almacenada en el interior del subsuelo de la Tierra. Donde el calor se produce exclusivamente debido al Sol y a la Tierra (Cárcel & Martínez, 2015).

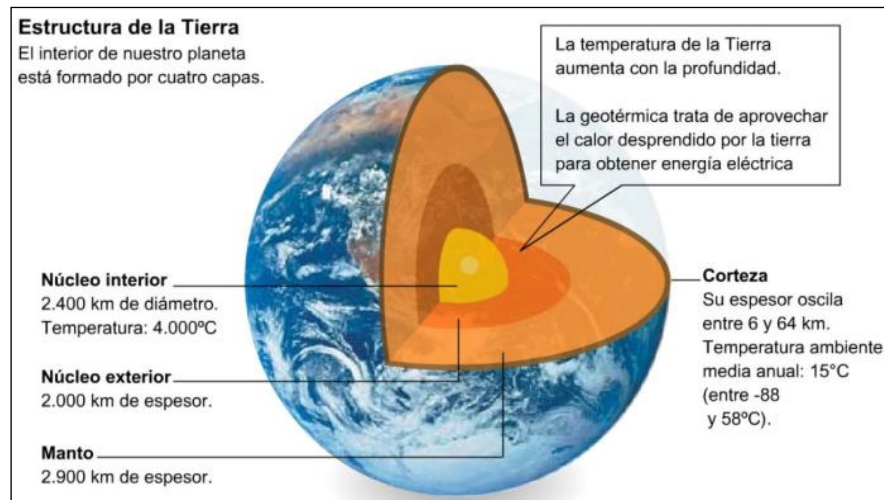


Figura 2. Composición del interior del planeta Tierra

Fuente: (Cárcel & Martínez, 2015)

De acuerdo con Cengel & Ghajar (2020), el calor puede ser transportado empleando tres formas, por conducción, radiación y convección. Dependiendo de la zona, el transporte de calor basándose en la convección logrando darse en el núcleo líquido externo, y considerando la conducción, donde se da entre el núcleo externo y el manto sólido. Y la convección como conducción del calor se da entre la corteza y ocupa un papel relevante en la generación o creación de un campo de energía geotérmica (De Brujin, 2020).

### Gradiente Geotérmico

Cuando se tiene un diferencial de temperatura entre el interior y la superficie de la Tierra, originan una afluencia o flujo constante de energía calorífica, logrando propagarse debido a la conducción y convección hacia la superficie de la corteza terrestre (ver Figura 3). De acuerdo con diferentes investigaciones, la temperatura tiene un aumento constante de 3°C cada vez que se perfora 0.1 km. Aunque, en zonas con anomalías que se relacionan con actividades tectónicas o volcánicas, dicho gradiente aumenta hasta en 10 a 30 veces de lo usual. (Palacio Villa et al., 2020)

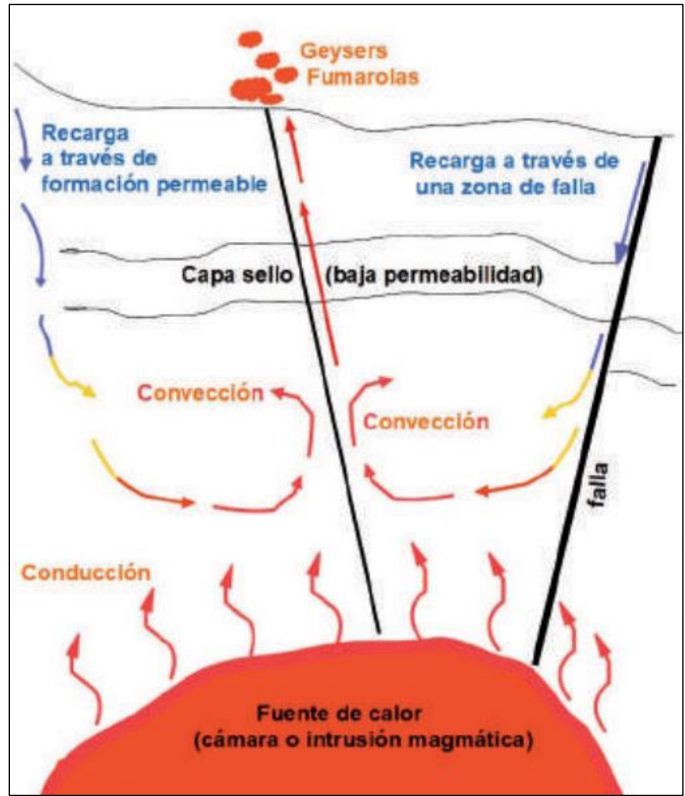


Figura 3. Principales componentes de un yacimiento geotérmico  
Fuente: (Palacio Villa et al., 2020)

### Energía Geotérmica en el mundo

En el 2018, la producción de electricidad empleando energía geotérmica fue de 130000 MW, que, en relación al año anterior, se obtuvo un crecimiento del 6.5%, es decir, paso de 121 000 MW a 130 000 MW. (Schmerler Vainstein et al., 2019)

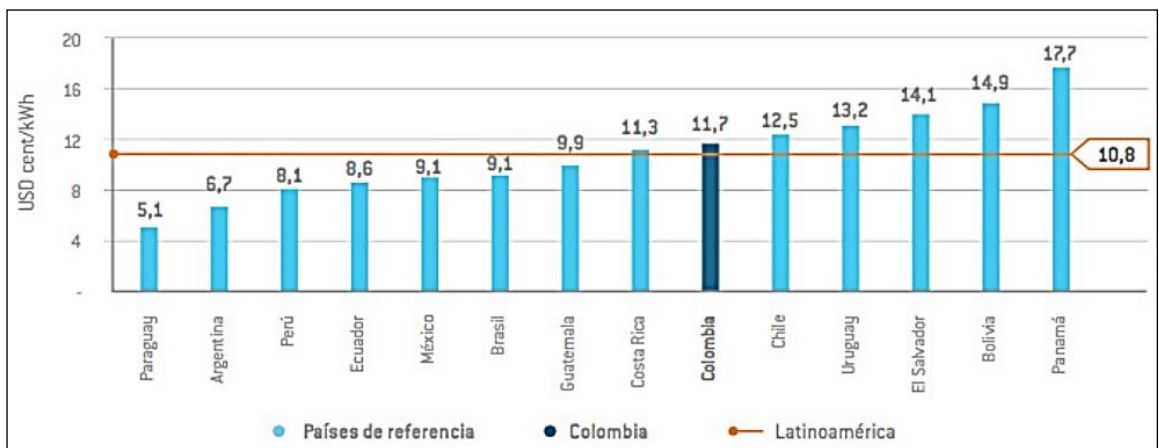


Figura 4. Costo nivelado de la energía geotérmica a nivel mundial  
Fuente: (Porras et al., 2018)

## **Energía Geotérmica en el Perú**

Hoy por hoy, ya se han establecido marcos normativos que buscan apoyar el ingreso de centrales que emplean energías sustentables para producción de corriente eléctrica, incluyendo la geotérmica, y cabe precisar, que se elaboró un informe sobre el Plan Maestro que busca la concientización e incentivo del desarrollo de la energía geotérmica. El mismo, afirma que existen 61 zonas que poseen un alto potencial para su desarrollo, determinando que se podría producir hasta 3 GW de potencia para la generación de corriente eléctrica. Y cabe mencionar, que la mitad de dichos campos geotérmicos se encuentran ubicados en el Sur del Perú (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012). La Figura 5 muestra el mapa geotérmico del Perú para poder ubicar los distintos campos geotérmicos que existen en territorio nacional.

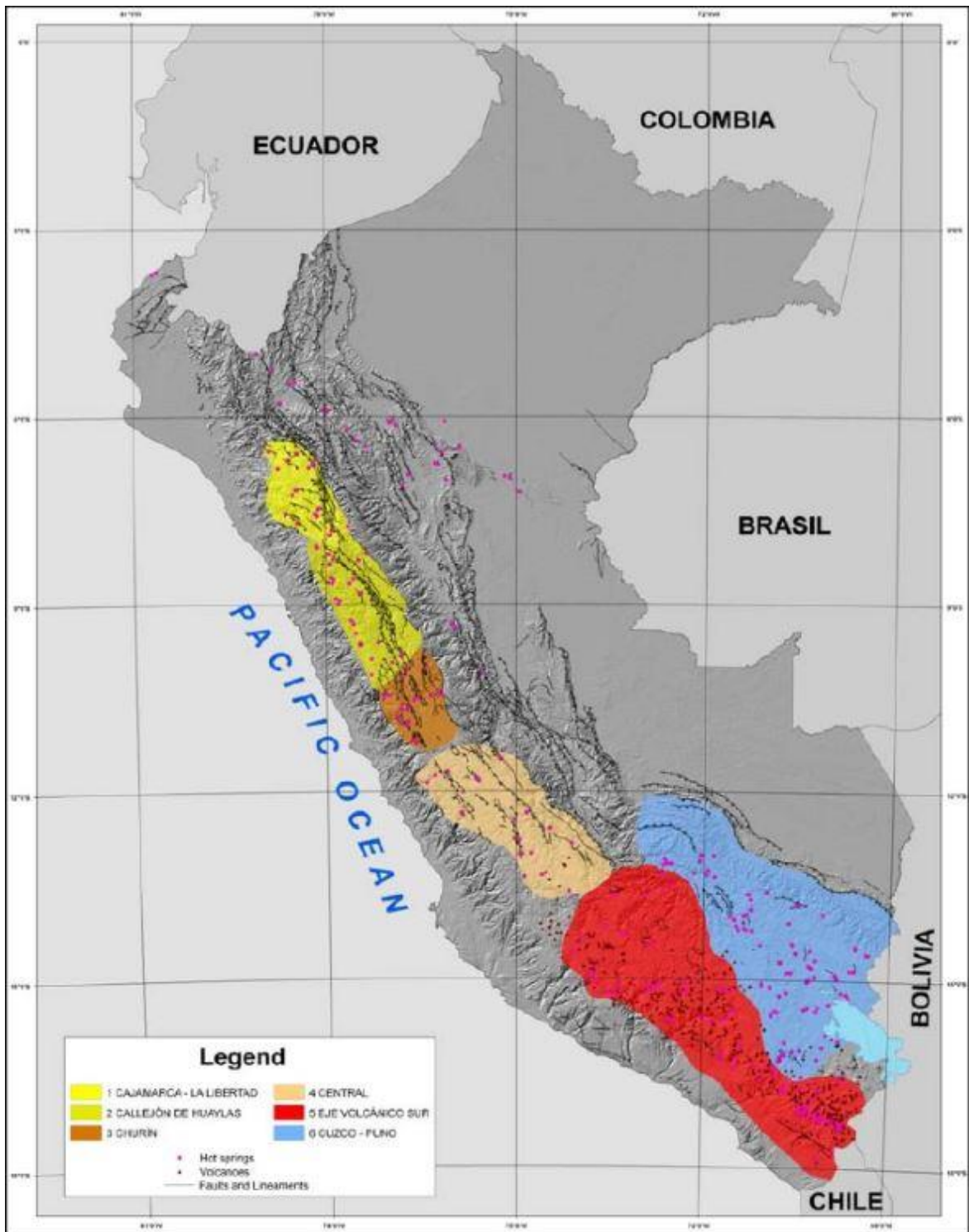


Figura 5. Mapa del potencial de energía geotérmica en Perú

Fuente: (Díaz & Guadalupe, 2021)



## Ciclo Rankine ideal

Este ciclo de potencia tiene como particularidad que hace uso del agua que se convierte en vapor a alta presión y temperatura, denominado sobrecalentado, como fluido para generar potencia eléctrica, con el fin de emplear el calor que posee su interior al entrar en la turbina y mover el eje para producir corriente eléctrica. En el análisis de dicho ciclo, se emplean los principios de balance de masa y energía, donde se determinan las características termodinámicas en cada estado al emplear las tablas adecuadas. (Cengel & Ghajar, 2020)

En la Figura 6 se observa el ciclo y esquema para un Ciclo Rankine Idealizado.

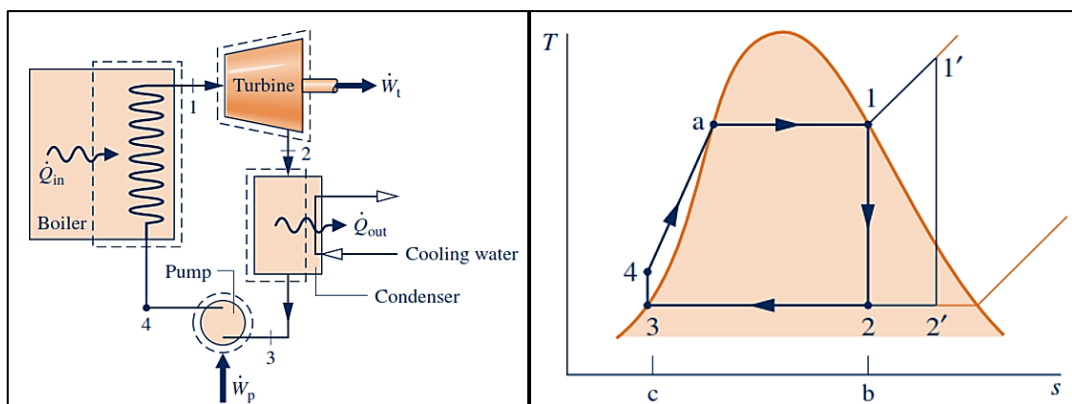


Figura 6. Configuración de un Ciclo Rankine ideal y su diagrama termodinámico T-s

Fuente: (Moran et al., 2018)

## Ciclo Binario

Para este tipo de centrales de generación de corriente eléctrica se hace uso de 2 fluidos, siendo uno el geotérmico y otro que se emplea en el Ciclo Rankine Orgánico. Este ciclo es distinto a los de vapor flash o vapor seco porque en ninguna instancia de contacta el flujo geotérmico con la turbina. (Hernández Ochoa et al., 2021)

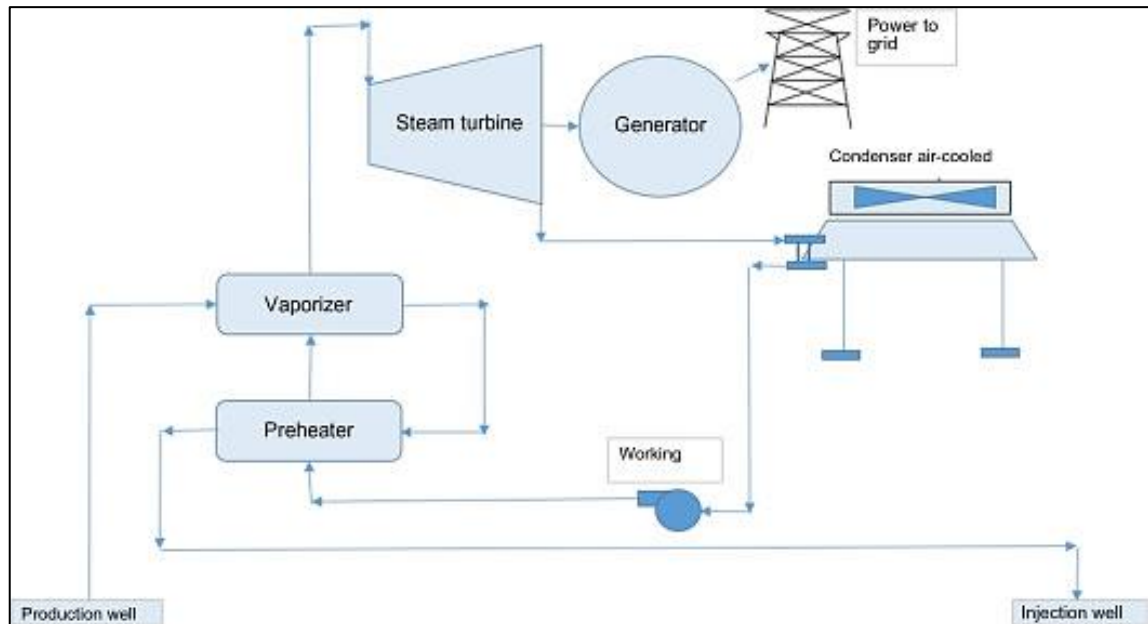


Figura 7. Configuración de un Ciclo Rankine binario

Fuente: (Hernández Ochoa et al., 2021)

### Intercambiador de calor

Este dispositivo sirve para que exista un intercambio de calor entre dos flujos, los cuales tienen diferentes temperaturas y que generalmente nunca se mezclan, son utilizados en múltiples aplicaciones industriales. Existen dos tipos de intercambiadores de calor, de contraflujo y de flujo paralelo, en el primero, los flujos van en direcciones opuestas y en el segundo, los flujos van en la misma dirección. (Cengel & Ghajar, 2020)

### Análisis de rentabilidad

García et al. (2021), indican que es importante hacer un análisis de los indicadores de rentabilidad en todo proyecto para determinar si dicho proyecto es factible y rentable en el tiempo. Dichos indicadores de rentabilidad son el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), tiempo de recuperación de la inversión (Tr) y la relación beneficio-costos.

Daniels et al. (2019) menciona que para obtener la relación Beneficio Costo (R B/C) se debe emplear la siguiente ecuación:

$$R_{B/C} = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{B_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j}}$$

Donde:

$B_j$ : Ingresos obtenidos durante la vida útil del proyecto,  $C_j$ : Costos generados durante la vida útil del proyecto,  $j$ : Período de tiempo que se busca evaluar,  $i$ : Tasa de interés o TMR,  $n$ : Vida útil o tiempo del proyecto.

Kousky et al. (2019) menciona que la ecuación para determinar el retorno sobre la inversión es:

$$ROI = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{R_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}}$$

Donde:

$R_t$ : Utilidad o beneficio generado en el tiempo de inversión,  $C_t$ : Costo de inversión total en el tiempo,  $i$ : tasa de interés.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

##### **Tipo de investigación**

Aplicada: Debido a que buscó producir conocimiento aplicando de forma directa las teorías, fórmulas y experiencias referente al tema investigado sobre las centrales geotérmicas y dar respuesta al problema planteado en la investigación (Hidalgo et al., 2021).

##### **Diseño de investigación**

No experimental: Siendo explicativo, porque se buscó responder a los objetivos que se han planteado paso a paso y luego dar una explicación de si los datos calculados son adecuados y adicionalmente, brindar un panorama del funcionamiento de la central geotérmica. Cabe precisar, que no hubo una manipulación de las variables de manera deliberada (Hernández et al, 2018). Además, es transversal porque se dio en un tiempo determinado.

#### **3.2. Variables y operacionalización**

##### **Variable independiente:**

Diseño de central geotérmica.

##### **Variable dependiente:**

Mitigación de impacto ambiental.

#### **3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis**

**Población:** Todos los campos geotérmicos en el área nacional.

**Muestra:** El campo geotérmico de Ancocollo, Tacna.

**Muestreo:** No probabilístico.

**Unidad de análisis:** Campo Geotérmico de Ancocollo.

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

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

##### **- Revisión bibliográfica**

El emplear esta técnica permitió recopilar información sobre las características de los campos geotérmicos, sobre las centrales geotérmicas y de la metodología a emplear para su correcto análisis tanto termodinámico, técnico, económico y financiero, para ello se realizó un análisis y revisión en revistas de prestigio e indexadas, las mismas que fueron buscadas en Scopus, Web of Sciences, Pro Quest y Science Direct, teniendo en consideración que tengan un impacto alto en el ámbito académico.

##### **- Análisis documental**

Consiste en la búsqueda de data e información en diferentes bibliografías actualizadas que sean de gran impacto y contenido en relación al tema que se está investigando, y también de revistas indexadas, artículos de revisión de literatura, artículos científicos, fichas técnicas, manuales, entre otros. El instrumento para recolectar datos se llama registro de datos, es decir, se extrae información de otra investigación y que no es necesario validar dicha información porque ya otro investigador la validó. Para la presente investigación se empleó el informe elaborado por JICA (2014), sobre la energía geotérmica disponible en el país, ya que contiene datos sobre las temperaturas que se pueden hallar en cada pozo geotérmico, la potencia posible de desarrollo para producción de energía eléctrica, tales parámetros serán importantes para llevar a cabo el desarrollo de los objetivos específicos planteados. (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012)

### **3.5. Procedimientos**

El procedimiento que fue empleado se detalla seguidamente:

- a) Al empezar a analizar el ciclo termodinámico, fue necesario seleccionar el fluido orgánico que fue empleado en el Ciclo Rankine Orgánico (ORC), para lo cual se realizó un análisis de comparación para los fluidos seleccionados para dicho ciclo y que están disponibles en el mercado nacional, para finalmente, escoger el que

logre obtener el mayor puntaje y permita la optimización del Ciclo Rankine Orgánico.

- b) Empleando las tablas termodinámicas, se calcularon los parámetros en cada estado del Ciclo ORC, esto es, las presiones en los equipos, temperaturas, entalpías, entropías y volumen específico, para luego determinar los trabajos específicos de turbina y bomba, el calor de entrada, eficiencia, flujos másicos, entre otros parámetros.
- c) Seguidamente, se realizó la selección del equipamiento necesario que formó parte de la central geotérmica, permitiendo optimizar la producción de energía eléctrica producida.
- d) Posteriormente, se hizo un análisis de los indicadores de rentabilidad, calculando el VAN, TIR, relación Beneficio-Costo y tiempo de recuperación de la inversión, para analizar si es factible y rentable el proyecto propuesto.
- e) Al final, se calculó en que tanto se reduce la contaminación ambiental, es decir, se calculó el índice de contaminación provocado por la central geotérmica propuesta y determinar si en realidad contribuye a mitigar el impacto ambiental al compararse con otras investigaciones.

### **3.6. Método de análisis de datos**

Los parámetros determinados en la actual investigación se procesaron de forma manual y también usando programas que permitan comprobar que el procedimiento empleado y los datos obtenidos son los adecuados, se empleó además software para resolver problemas termodinámicos que involucren Ciclos de Potencia como Rankine, y obtener las gráficas respectivas. Los valores de cada parámetro obtenido en cada estado se comprobará con información obtenida de un software especialmente empleado para determinar las propiedades termodinámicas de cualquier fluido orgánico de trabajo, con el fin de saber si se ha procedido correctamente o si hay que corregir algo que se hizo mal. Este proceso es de importancia, ya que permitió dar respuesta a los objetivos que se han planteado, para luego elaborar la discusión de dichos resultados, conclusiones y recomendaciones al final de la investigación.

### **3.7. Aspectos éticos**

Toda investigación o informe utilizado para la elaboración del presente proyecto, no fue alterado, es decir, que el contenido fue parafraseado pero referenciado para la verificación del material bibliográfico sin perder el mensaje o interpretación ofrecida, teniendo en consideración la normativa empleada para su elaboración, la cual es la norma APA 7ma edición, para realizar las referencias y citas de todo material científico empleado. Además, se consideró la consultoría de un asesor experto en investigación, con el fin de que el proyecto se elabore de la mejor manera posible y asemejándose en lo más posible a la realidad, y se evitó cualquier tipo de copia o plagio, para buscar la total originalidad del proyecto. Cabe precisar, que fue necesario contar con la asesoría de un asesor externo que tenga amplio conocimiento del tema que se está investigando.

## **IV. RESULTADOS**

### **4.1. Elección del fluido para el ciclo orgánico Rankine**

Entre uno de los ciclos de potencia más empleados para una central geotérmica es el Ciclo Orgánico Rankine (ORC, por sus siglas en el idioma inglés), por lo que es necesario escoger un adecuado fluido de trabajo para optimizar la extracción de energía en el ciclo. Entre los más empleados se tiene a los siguientes:

#### **- R12**

Este gas refrigerante, llamado Diclorofluorometano, se le consideró un nivel alto de peligro por la Unión Europea (UE) para el ambiente y esencialmente para la capa de ozono. En concordancia con el Reglamento N° 2037/2000, su generación, uso y distribución quedó prohibida en el continente europeo, pero se puede emplear bajo ciertas excepciones. Por ejemplo, Estados Unidos prohibió su utilización, para cumplir con el Protocolo de Montreal (Parlamento Europeo, 2010).

#### **Características del R12**

Entre las características que posee este gas refrigerante se tienen a las siguiente:

- Gas incoloro.
- Genera un efecto negativo en la capa de ozono, por ello se ha buscado sustituirlo.
- Tóxico, por ello no brinda garantías cuando ocurran fugas.
- Posee una densidad mayor que el oxígeno, de 4.18 veces mayor.
- No es explosivo o inflamable.
- La cantidad de volumen de humedad no debe ser mayor a 0.00004%.

#### **Precios del R12**

El costo de dicho refrigerante puede ser variado de un país a otro, aunque al buscar por internet, se tiene un costo que puede variar entre \$ 20 hasta \$ 50. Aunque en el precio también puede verse afectado dependiendo del cilindro que almacene al gas y su masa (Gasica, 2020).



## Aplicaciones del R12

Se empleó en sistemas de acondicionamiento de aire doméstico y automotriz, aunque fue más empleado en el automotriz. Actualmente, ha quedado restringido su uso, por lo cual se ha reemplazado por otros gases refrigerantes sustitutos más eficientes que el R12. Su efecto perjudicial en la capa de ozono repercutió en su uso por lo que se obligó a las empresas a no utilizarlo (Gasica, 2020).

Por ejemplo, si el auto usaba R12 como gas refrigerante para su sistema de aire acondicionado, este puede ser reemplazado por el R134a, que es bastante parecido al R12, siendo bastante compatible para dicho caso. Solo se deberá cambiar el filtro secador, el aceite empleado por el sistema, las tomas de carga, la etiqueta que permite identificar el aceite y la cantidad de refrigerante que será utilizado (Gasica, 2020).



Figura 8. Gas refrigerante R12

Fuente: (Bing Cool, 2023)

En la Figura 9 se aprecia las curvas de entalpía vs presión para el refrigerante R12.

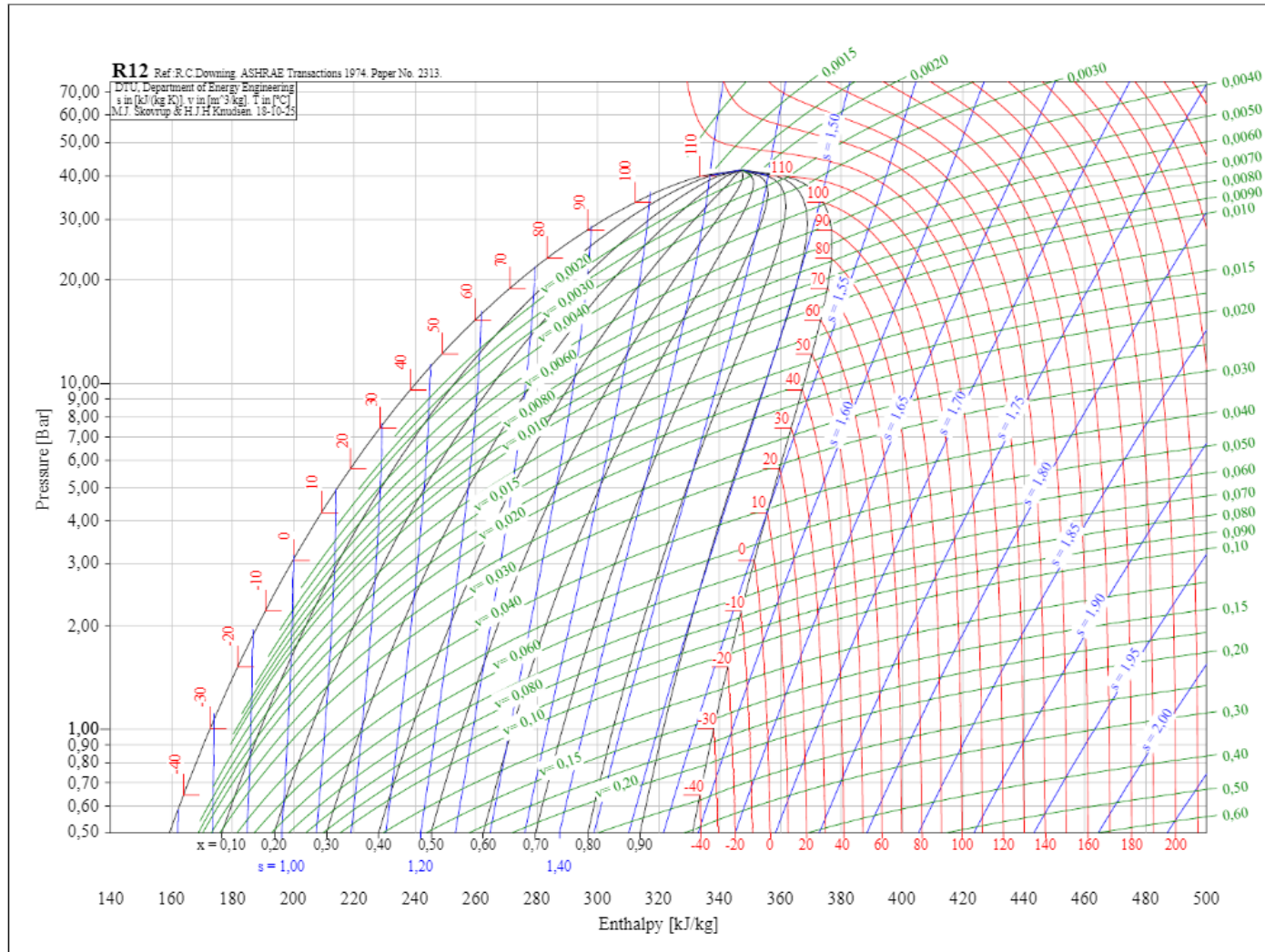


Figura 9. Curva entalpía vs Presión para el R12 (Diagrama Mollier)

Fuente: (Gonzales, 2022)

## - R134a

Viene a ser un tipo de refrigerante hidrofluorocarburos puro, sustituyendo a los que son contaminantes como el R12 en nuevas instalaciones. Dichos refrigerantes HFC vienen a ser gases fluorados de 3era generación que se han generado a partir de átomos de hidrógeno, flúor y carbono, y como no poseen cloro en su composición, ya no originan un agotamiento de la capa de ozono, donde su utilización ahora es considerada ecoamigable (Pochteca Perú, 2021).

### **Características del R134a**

Su capacidad calorífica es algo inferior que la del R12, aunque su ventaja significativa es su nulo daño a la capa de ozono porque no posee nada de cloro, ya que si existen accidentes de fugas, se pueden rellenar los equipos sin problema y fácilmente; pero el compresor empleado debe ser algo mayor que para otros gases refrigerantes hidrofluorocarburos, siendo altamente eficiente energéticamente, no es tóxico, ni irritante, no corrosivo y es no inflamable (Pochteca Perú, 2021).

Como dato adicional, sabiendo que no contamina al medio ambiente ni representar un peligro a la salud, dicho refrigerante R134a posee una conductividad de calor mejorada en relación al R12, reduciendo el consumo de refrigerante; y debido a que ambos poseen una conductividad térmica parecida, hacer modificaciones al sistema de refrigeración para ser adaptado por R134a es más sencillo (Pochteca Perú, 2021).

En los sistemas de acondicionamiento de aire vehicular, dicho gas ofrece un beneficio de que no posee ningún tipo de olor extraño, ayudando a mitigar la contaminación ambiental, con una humedad menor al 0.001% brindando una nula corrosión al sistema de refrigeración. Adicionalmente, su contenido de ácido es menor al 0.00001% y su rastro de evaporación es inferior al 0.01% (Pochteca Perú, 2021).

### **Aplicaciones del R134a**

- Dicho gas refrigerante se emplea en las siguientes aplicaciones:
- Sistemas de acondicionamiento de aire vehicular.
- Sistemas de refrigeración del hogar.

- Sistemas de enfriamiento centrífugo con agua.
- Cámaras frigoríficas para conservación.
- Transporte frigorífico y sistemas de refrigeración comercial.



Figura 10. Gas refrigerante R134a

Fuente: (Termoclima Andina SAC, 2023)

En la Figura 11 se puede observar el diagrama Mollier para el refrigerante R134a.

### R134a (1,1,1,2 Tetrafluoroetano)

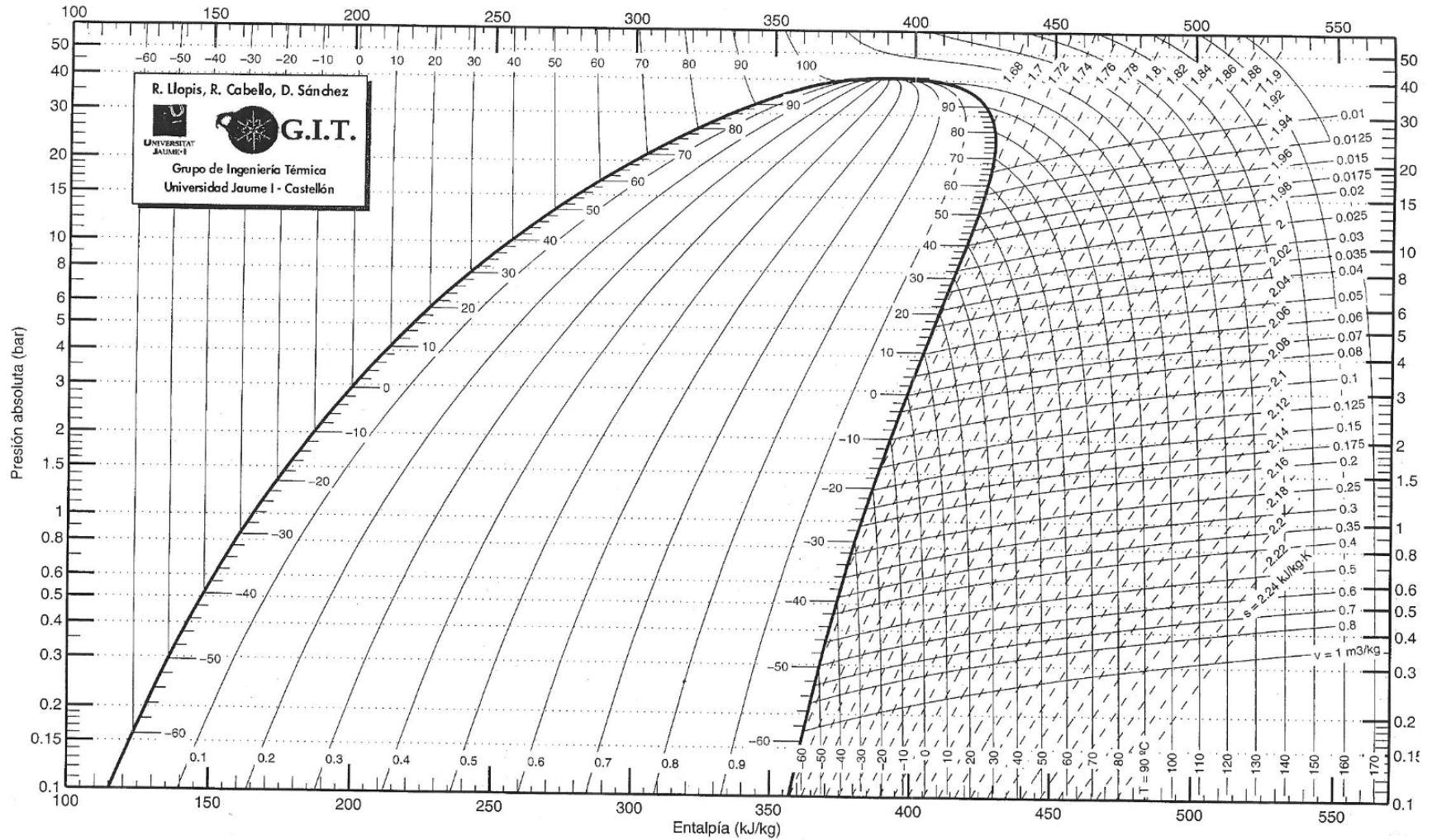


Figura 11. Diagrama Mollier del refrigerante R134a

Fuente: (Scalofríos, 2023)

## - R410a

Hablando químicamente, es una mezcla binaria, llamada azeotrópica, donde se han empleado dos gases refrigerantes hidrofluorocarbonos (HFC). Dichos gases son el HFC R125 llamado pentafluoroetano y el HFC R32 llamado diclorometano. Se le llama mezcla azeotrópica porque viene a ser una combinación de compuestos distintos donde la temperatura de ebullición es generalmente constante y no varía en el tiempo (Frikko, 2020).

### **Características del R410a**

El R410a posee características similares a las de un azeótropo, por ello su comportamiento es como si fuera un solo refrigerante. Entre una de sus propiedades más destacadas es que posee características frigoríficas, donde su nivel de inflamabilidad es bajísimo, o, mejor dicho, nulo.

- No tóxico.
- Ecoamigable, con un impacto nulo para la capa de ozono.
- Los sistemas de acondicionamiento de aire que emplean R410a tienen un consumo menor de energía y un rendimiento más alto.
- Nulo contenido de cloro.
- Opera de forma altamente silenciosa.
- Según la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) es un gas con clasificación A1/A1, que quiere decir que es no tóxico y no inflamable, aunque se dieran accidentes de fugas.
- Por ser azeotrópico, es un gas altamente estable, que puede volver a recargarse nuevamente en su fase de líquido.
- Tiene excelentes propiedades termodinámicas.
- Posee una capacidad volumétrica frigorífica superior al R22.
- Posee un elevado rendimiento cuando es usado en modo "calor".
- No produce dióxido de carbono.
- Debido a sus propiedades termodinámicas elevadas mejoran el tamaño y calidad de los sistemas de acondicionamiento de aire, permitiendo emplear compresores

más pequeños, menor diámetro en las tuberías y altas velocidades.

- No se logra separar en el interior del sistema y debido a su composición no varía su fase, aunque exista caso de fuga.

### **Aplicaciones del R410a**

En la actualidad, es más empleado para sistemas de acondicionamiento de aire domésticos y comerciales por sus excelentes propiedades. También se puede emplear en sistemas de bombas de calor, deshumidificadores, refrigeración y aplicaciones HVAC (Solquimia, 2023).



Figura 12. Refrigerante R410a

Fuente: (Tekko, 2022)

En la Figura 13 se puede observar el diagrama de Mollier para el refrigerante R410a.

# R410A

([R32, R125][0.5, 0.5])

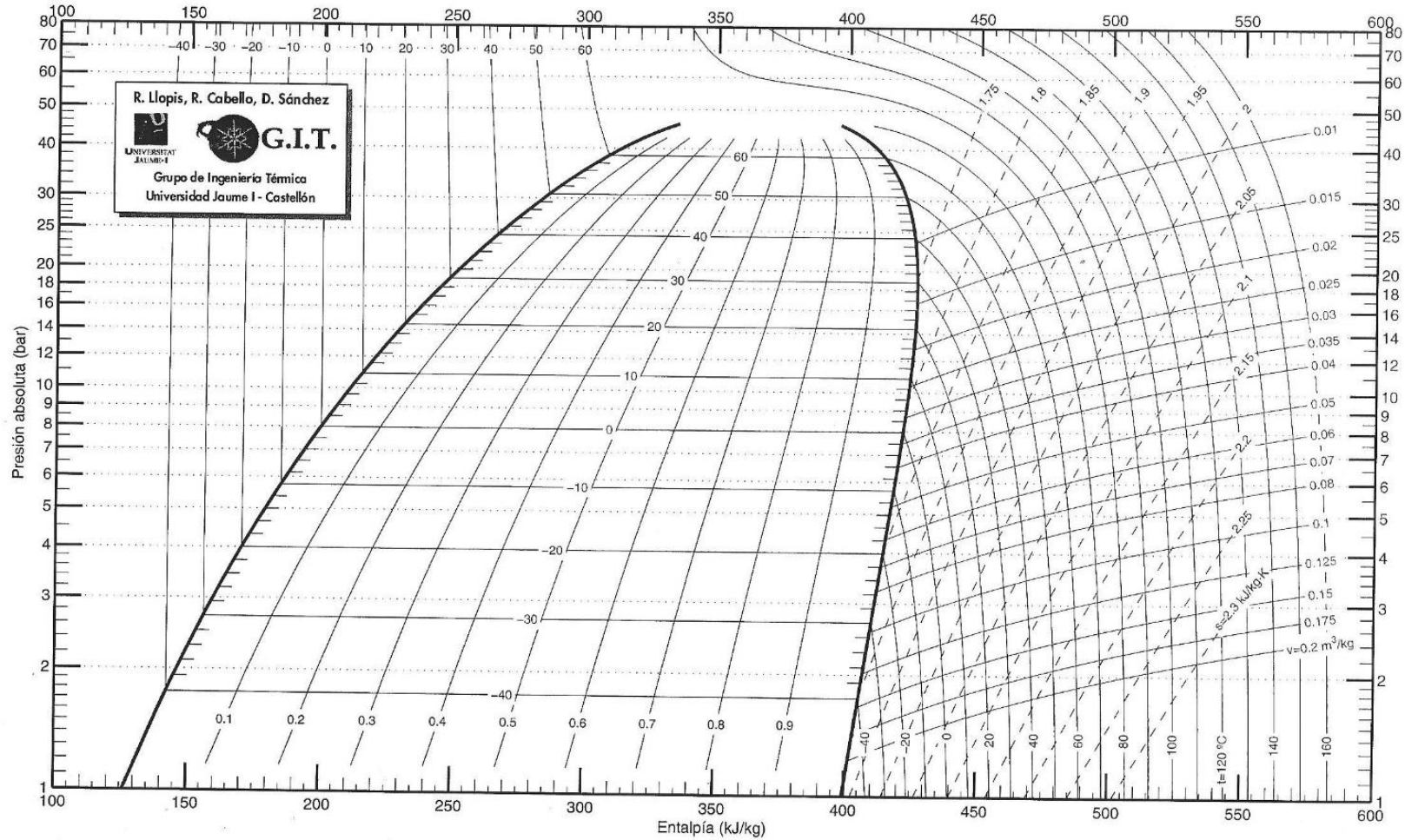


Figura 13. Diagrama de Mollier para refrigerante R410a

Fuente: (Scalofríos, 2023)



## - R600a

Es un refrigerante puro empleado por lo general para sistemas de refrigeración doméstico con una elevada eficiencia, donde su característica primordial es que posee una baja presión de operación, su inflamabilidad y la bajísima cantidad de gramos que es requerido por los equipos (ConforempresariaL, 2020).

### **Características del R600a**

El Isobutano o R600a es un refrigerante que se emplea básicamente en un ciclo normal de compresión. Dicho ciclo tiene como característica que posee bajas presiones de operación, en comparación con otros refrigerantes más tradicionales (ConforempresariaL, 2020).

### **Aplicaciones del R600a**

Entre las distintas aplicaciones se tienen a las siguientes (ConforempresariaL, 2020):

- Se emplea en refrigeración doméstica y comercial.
- Posee una capacidad volumétrica más baja que el R12, en torno al 50%, por lo que no es considerado un sustituto de dicho refrigerante.
- Se emplea también en equipos de refrigeración inverter, es decir, equipos de enfriamiento y variación de frío, que se regula cambiando el giro del motor con frecuencia.



Figura 14. Refrigerante R600a

Fuente: (Zhejiang NOF Chemical Co. Ltd., 2023)

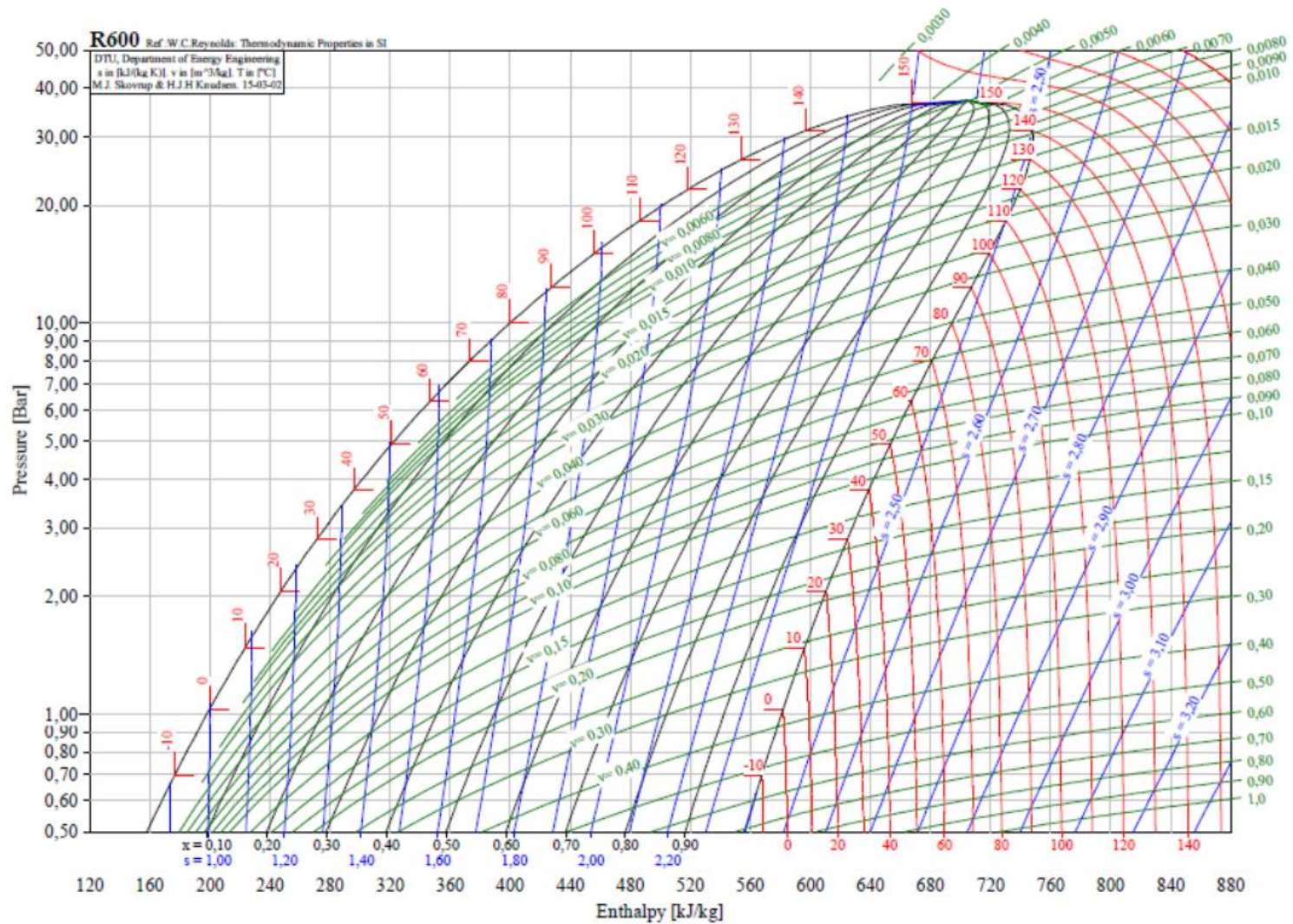


Figura 15. Diagrama de Mollier para el refrigerante R600a

Fuente: (Corte Juera & Flores Suqui, 2015)

## - R601a

El isopentano o R601a es un líquido incoloro, altamente volátil y transparente que posee un aroma agradable. Viene a ser insoluble en el agua y es prácticamente miscible con la gran mayoría de disolventes orgánicos como éter y etanol. Es empleado en síntesis orgánica y como disolvente. Se genera a partir de la rectificación y purificación del aceite destilado hidrocarburo ligero componente de aceite o cinco carbonos. En condiciones ambientales normales posee fase líquida y es altamente volátil, inflamable y explosivo (Sirloong Chemical, 2019).

### **Características del R601a**

Entre las características más destacadas se tiene a las siguientes:

- Es tóxico, inhalación aguda.
- Altamente inflamable y explosivo.
- Volátil.
- Se debe almacenar separado de ácidos y oxidantes.

### **Aplicaciones del R601a**

Entre sus principales aplicaciones se tienen:

- Se usa como agente de condensación para la generación de polietileno.
- Reemplaza al Freón como refrigerante.
- Se emplea en refrigeración y congelación.



*Figura 16. Refrigerante R601a*

Fuente: (Freeze Refrigerant, 2023)

## Análisis comparativo

En la Tabla 1 se puede apreciar a los fluidos de trabajo considerados en la presente investigación los cuales son el Diclorofluorometano (R12), Tetrafluoroetano (R134a), fluido frigorígeno (R410a), Isobutano (R600a) y el isopentano (R601a). Con dichos fluidos se realizó un análisis comparativo para determinar cuál es el que logra optimizar el ciclo orgánico Rankine.

Tabla 1. *Diferentes fluidos de trabajo empleados en ORC*

Descripción	Denominación comercial
Diclorofluorometano	R12
Tetrafluoroetano	R134a
Fluido frigorígeno	R410a
Isobutano	R600a
Isopentano	R601a

*Fuente: Elaboración propia.*

Del análisis, los fluidos R12, R134a y R410a vienen a ser refrigerantes utilizados ampliamente en múltiples sistemas de refrigeración comercial e industrial, además de utilizarse en sistemas de acondicionamiento de aire, debido a que poseen propiedades y características termodinámicas muy buenas para dicho uso, pero el R410a destaca entre ambos, debido a que tienen un punto de ebullición a presión atmosférica de  $-52.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un poder de vaporización de  $271.5\text{ kJ/kg}$ , mientras que para el R134a es de  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un poder de vaporización de  $197.44\text{ kJ/kg}$ , adicionalmente que la presión máxima de trabajo del R410a es de hasta  $4\text{ MPa}$ , y para el R134a es de hasta  $2.5\text{ MPa}$ , de acuerdo con tablas termodinámicas; y el fluido R12 ya no está siendo usado por ser anestésico y poseer menores características respecto a los antes mencionados. Luego, el Isobutano (R600a) y el isopentano (R601a), vienen a ser combustibles, llamados alcanos, por lo que son inflamables y peligrosos, contribuyendo a un aumento de la contaminación o gases de efecto invernadero.

De la Tabla 2, se puede mencionar que los fluidos orgánicos de trabajo R12, R134a, R410a, R600a y R601a, el que más se adecua y posee mejores propiedades es el R410a, porque es ecoamigable, posee un alto poder de vaporización, nulo nivel de toxicidad, con una clasificación por la ASHRAE de A1, el punto más bajo de ebullición y adicionalmente, el precio es similar al de los demás fluidos.

Tabla 2. Características de los diferentes fluidos de trabajo para ORC

Característica	Fluido				
	R12 (Diclorofluorometano, $CCl_2F_2$ )	R134a (Tetrafluoroetano, $CH_2F - CF_3$ )	R410a (Tetrafluoroetano + Pentafluoroetano, $50\%CHF_2 - CF_3 + 50\%CH_2F - CF_3$ )	R600a (Isobutano, $C_4H_{10}$ )	R601a (Isopentano, $C_5H_{12}$ )
Punto de ebullición a presión atmosférica (°C)	-29.8	-26.3	-52.1	-11.7	27.8
Inflamable	No	No	No	Si	Si
Amigable con medio ambiente	Si	Si	Si	Si	Si
Calor de Vaporización (J/kg)	152 420	197 440	271 500	332 000	-
Tóxico	No (Anestésico)	No	No	No	No
Clasificación ASHRAE	A1	A1	A1	A3	A3

Fuente: Elaboración propia.

## Análisis ponderado

Se elaboró una matriz ponderada para poder seleccionar el fluido que mejores prestaciones brinda al ser usado en el Ciclo Orgánico Rankine.

La Tabla 3 detalla las razones empleadas para el análisis de la matriz ponderada.

Tabla 3. Razones para matriz ponderada

RAZÓN	VALOR
Irrelevante – precio alto	1
Relevante – precio moderadamente alto	2
Adecuado – precio normal	3
Excelente – precio relativamente bajo	4
Muy excelente – precio bajo	5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Parámetros considerados para matriz de ponderada

PARAMETROS	CRITERIO
<b>Grado de contaminación</b>	Permite verificar que tan contaminantes es el fluido seleccionado.
<b>Poder calorífico (P.C.)</b>	Brinda el valor del poder calorífico del fluido.
<b>Precio</b>	Precio de cada fluido orgánico de trabajo.
<b>Tóxico</b>	Permite conocer el nivel de toxicidad del fluido.
<b>Inflamable</b>	Permite conocer el nivel de inflamabilidad que posee el fluido.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Matriz ponderada para seleccionar el fluido orgánico de trabajo

Fluido	Parámetros para seleccionar										Total
	Grado de contaminación		P.C.		Precio		Tóxico		Inflamable		
	0.2	0.25	0.25	0.50	0.35	1.05	0.10	0.3	0.10	0.10	
R12	4	0.8	2	0.50	3	1.05	3	0.3	3	0.30	2.95
R134a	3	0.6	3	0.75	4	1.40	5	0.5	4	0.40	3.65
R410a	3	0.6	4	1.00	4	1.40	5	0.5	5	0.50	4.00
R600a	3	0.6	5	1.25	4	1.40	5	0.5	1	0.10	3.85
R601a	3	0.6	5	1.25	4	1.40	5	0.5	1	0.10	3.85

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 5 se puede concluir que el mejor fluido orgánico de trabajo para el Ciclo Orgánico Rankine de la central geotérmica es el refrigerante R410a, con una puntuación de 4.00. Las tablas de propiedades termodinámicas del R410a fueron agregadas en el Anexo 2 (Borgnakke & Sonntag, 2019).

#### 4.2. Parámetros considerados para evaluación termodinámica del ORC

El ciclo orgánico Rankine debe tener ciertos parámetros para poder funcionar de forma adecuada y que pueden configurarse dependiendo del equipamiento seleccionado, donde dichos parámetros de manera aproximada son:

$$T_3 = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_4 = 40 \text{ bar (máxima presión de trabajo)}$$

La planta geotérmica propuesta posee una potencia de 90 000 kW, de acuerdo con la Tabla 6, de la información obtenida de JICA (2012).

Tabla 6. *Potencial posible de desarrollo para distintos campos geotérmicos*

<b>Campo geotérmico</b>	<b>Potencial energético (MWe)</b>	<b>Capacidad de desarrollo posible (MWe)</b>
Chungara Kallapuma	84	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
Jesús María	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: JICA (2012).*

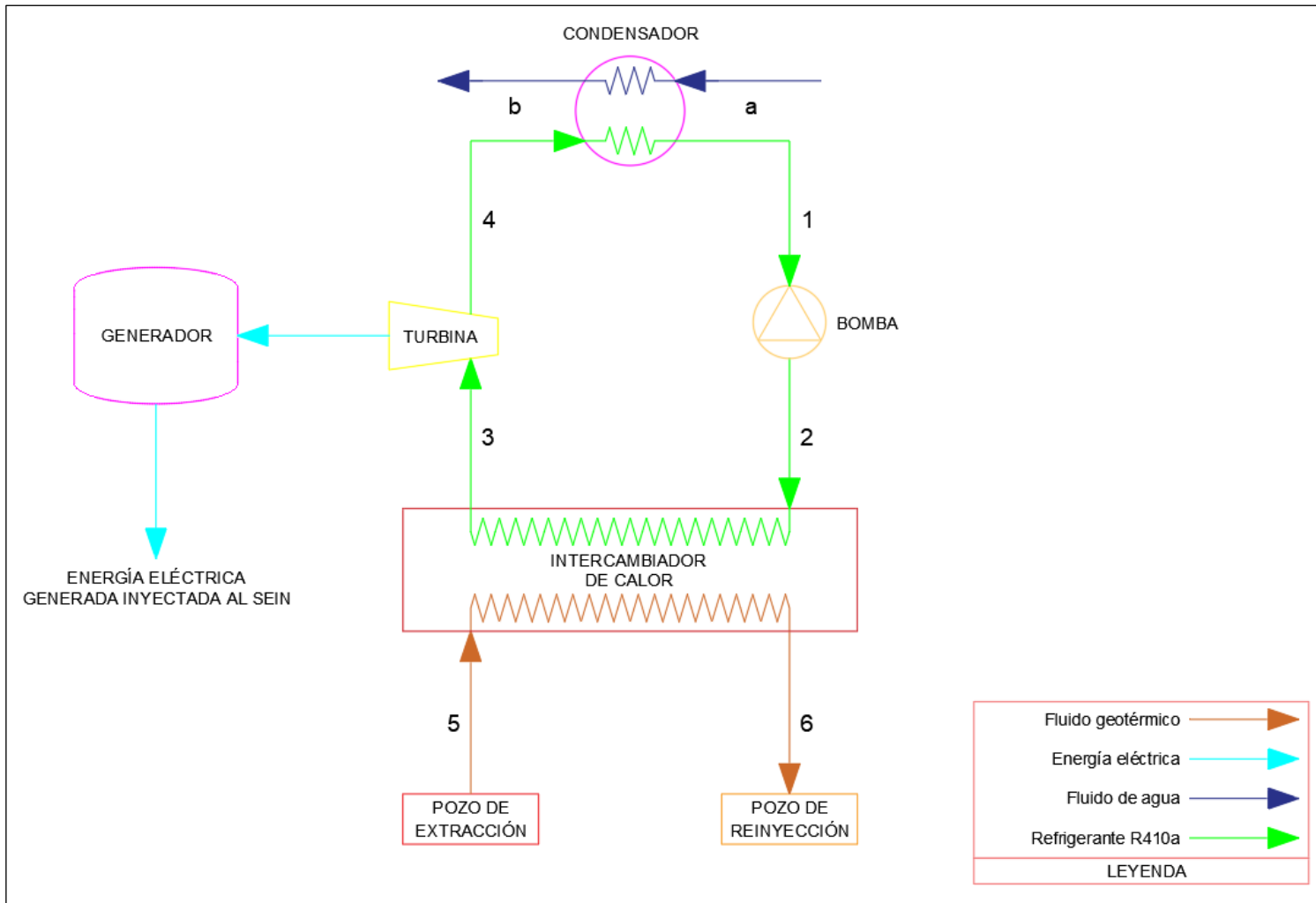


Figura 17. Esquema termodinámico para la central geotérmica propuesta

Fuente: Elaboración propia.



## Análisis termodinámico

**Estado 1:** Se tiene líquido saturado, al emplear las tablas termodinámicas, se obtuvo lo siguiente:

$$P_1 = 90 \text{ kPa}$$

Tabla 7. Parámetros para calcular la temperatura del estado 1

T (°C)	P (kPa)
-55	84
$T_1$	90
-51.4	101.3

Fuente: Elaboración propia.

$$T_{1a} = -55 \text{ °C}$$

$$P_{1a} = 84 \text{ kPa}$$

$$T_{1c} = -51.4 \text{ °C}$$

$$P_{1b} = P_1 = 90 \text{ kPa}$$

$$P_{1c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$T_1 = T_{1a} + (T_{1c} - T_{1a}) \cdot \left( \frac{P_{1b} - P_{1a}}{P_{1c} - P_{1a}} \right) = -53.75 \text{ °C}$$

Tabla 8. Parámetros para calcular la entropía en el estado 1

s (kJ/kg. K)	P (kPa)
-0.0912	84
$S_1$	90
-0.0688	101.3

Fuente: Elaboración propia.

$$s_{1a} = -0.0912 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$P_{1a} = 84 \text{ kPa}$$

$$s_{1c} = -0.0688 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$P_{1b} = P_1 = 90 \text{ kPa}$$

$$P_{1c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$s_1 = s_{1a} + (s_{1c} - s_{1a}) \cdot \left( \frac{P_{1b} - P_{1a}}{P_{1c} - P_{1a}} \right) = -0.0834 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

Tabla 9. Parámetros para calcular la entalpía en el estado 1

h (kJ/kg)	P (kPa)
-20.64	84
$h_1$	90
-15.70	101.3

Fuente: Elaboración propia.

$$h_{1a} = -20.64 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{1a} = 84 \text{ kPa}$$

$$h_{1c} = -15.10 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{1b} = P_1 = 90 \text{ kPa}$$

$$P_{1c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$h_1 = h_{1a} + (h_{1c} - h_{1a}) \cdot \left( \frac{P_{1b} - P_{1a}}{P_{1c} - P_{1a}} \right) = -18.72 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 10. Parámetros para calcular el volumen específico en el estado 1

v (m³/kg)	P (kPa)
0.000735	84
$v_1$	90
0.000741	101.3

Fuente: Elaboración propia.

$$v_{1a} = 0.000735 \frac{m^3}{kg}$$

$$P_{1a} = 84 \text{ kPa}$$

$$v_{1c} = 0.000741 \frac{m^3}{kg}$$

$$P_{1b} = P_1 = 90 \text{ kPa}$$

$$P_{1c} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$v_1 = v_{1a} + (v_{1c} - v_{1a}) \cdot \left( \frac{P_{1b} - P_{1a}}{P_{1c} - P_{1a}} \right) = 0.0007371 \frac{m^3}{kg}$$

**Estado 2:** Se encuentra la bomba, que comprime el fluido orgánico de trabajo, empleando la siguiente ecuación para calcular la entalpía:

$$P_2 = 4 \text{ MPa}$$

$$w_{\text{entrada,bomba}} = v_1 \cdot (P_2 - P_1) = 2.8821 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{entrada,bomba}} = -15.8379 \frac{kJ}{kg}$$

Para poder determinar la temperatura en dicho estado, se empleó la entalpía y se calculó la temperatura considerando que se encontraba en saturación, esto es, que era líquido saturado.

Tabla 11. Parámetros para calcular la temperatura en el estado 2

h (kJ/kg)	T (°C)
-20.64	-55
-15.8379	$T_2$
-15.70	-51.4

Fuente: Elaboración propia de los autores.

$$T_{2a} = -55^{\circ}\text{C}$$

$$h_{2a} = -20.64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_{2c} = -51.4^{\circ}\text{C}$$

$$h_{2b} = h_2 = -15.8379 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2c} = -15.70 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = T_{2a} + (T_{2c} - T_{2a}) \cdot \left( \frac{h_{2b} - h_{2a}}{h_{2c} - h_{2a}} \right) = -51.50^{\circ}\text{C}$$

**Estado 3:** Se observa líquido saturado a la presión de 4 000 kPa (4 MPa), que se encuentra en la entrada del intercambiador de calor.

$$P_3 = P_2 = 4 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 150^{\circ}\text{C}$$

$$h_3 = 403.64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_3 = 0.01033 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$s_3 = 1.2417 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

**Estado 4:** A la salida de la turbina, se considera un proceso isoentrópico, por lo tanto:

$$P_4 = 90 \text{ kPa}$$

$$s_4 = s_3 = 1.2417 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

De acuerdo a los cálculos realizados, en este estado se tiene vapor sobrecalentado, entonces:

$$T_4 = -33.13^{\circ}\text{C}$$

$$h_4 = 271.882 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_4 = 0.32142 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Seguidamente, se utilizaron las eficiencias isentrópicas de los equipos empleados, es decir, de la bomba y la turbina, con el propósito de que el ciclo sea lo más cercano a la realidad.

$$\eta_{bomba} = 80\% = 0.80$$

$$w_{bomba,real} = \frac{w_{entrada,bomba}}{\eta_{bomba}} = 3.6026 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2r} = h_1 + w_{bomba,real} = -15.1174 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 12. Parámetros para calcular la temperatura 2r

h (kJ/kg)	T (°C)
-15.70	-51.4
-15.1174	$T_{2r}$
-13.80	-50

Fuente: Elaboración propia.

$$T_{2ar} = -51.4^\circ C$$

$$h_{2ar} = -15.70 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_{2cr} = -50^\circ C$$

$$h_{2br} = h_{2r} = -15.1174 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2c} = -13.80 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_{2r} = T_{2ar} + (T_{2cr} - T_{2ar}) \cdot \left( \frac{h_{2br} - h_{2ar}}{h_{2cr} - h_{2ar}} \right) = -50.97^\circ C$$

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

$$w_{turbina\ ideal} = h_3 - h_4 = 131.758 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{turbina\ real} = \eta_{turbina} \times w_{turbina\ ideal}$$

$$w_{turbina\ real} = 0.9 \times 131.758 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{turbina\ real} = 118.582 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{4r} = h_3 - w_{turbina\ real} = 285.058 \frac{kJ}{kg}$$

El calor de entrada en el intercambiador de calor es:

$$q_{entrada} = h_3 - h_2$$

$$q_{entrada} = 419.478 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo ideal de la bomba y la turbina son:

$$w_{turbina\ ideal} = 131.758 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{entrada,bomba} = 2.8821 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo neto ideal es:

$$w_{neto\ ideal} = w_{turbina\ ideal} - w_{entrada,bomba} = 128.8759 \frac{kJ}{kg}$$

Luego, el trabajo real de la bomba y turbina son:

$$w_{bomba,real} = 3.6026 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{turbina\ real} = 118.582 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo neto real es:

$$w_{neto\ real} = w_{turbina\ real} - w_{bomba,real} = 114.979 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora, considerando que la potencia que debe generar la turbina de vapor es de 90 MW, se puede calcular el flujo de masa del refrigerante R410a empleado, por lo tanto, se tuvo lo siguiente:

$$\dot{W}_{turbina} = 90\ MW$$

$$\dot{m}_{R410a} = \frac{\dot{W}_{turbina}}{w_{neto\ real}} = 782.75 \frac{kg}{s}$$

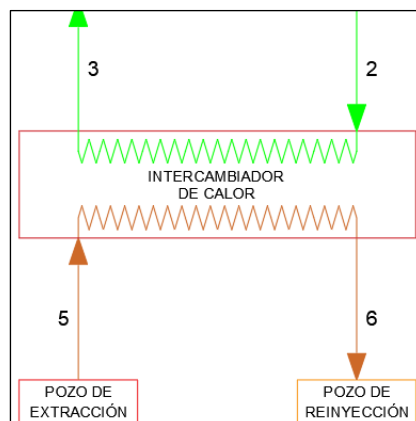


Figura 18. Esquema del intercambiador de calor

Fuente: Elaborado con AutoCAD 2022.

Luego, empleado los datos de temperatura de entrada y salida en el intercambiador de calor, se tuvo que:

$$T_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{2r} = -50.97 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_{p\text{ R410a}} = 1.335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$C_{p\text{ agua}} = 4.2605 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \text{ (Anexo 3)}$$

$$\dot{m}_{\text{R410a}} = 782.75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se determina el calor en el interior del intercambiador de calor:

$$\dot{Q}_{\text{intercambiador}} = \dot{m}_{\text{R410a}} \cdot C_{p\text{ R410a}} \cdot (T_3 - T_{2r}) = 210\,007.87 \text{ kW}$$

Calculando el flujo másico del fluido geotérmico:

$$\dot{m}_{\text{geotérmico}} = \frac{\dot{Q}_{\text{intercambiador}}}{C_{p\text{ agua}} \cdot (T_5 - T_6)} = 448.11 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{geotérmico}} = 1\,613\,196 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 947.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Anexo 3)}$$

$$\dot{V}_{\text{fluido.geotérmico}} = 1702.13 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Calculando el diámetro de las tuberías:

$$\dot{m}_{\text{pozo unitario}} = 200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$C_{\text{pozos}} = \frac{\dot{m}_{\text{geotérmico}}}{\dot{m}_{\text{pozo unitario}}}$$

$$C_{\text{pozos}} = \frac{782.75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 3.914$$

$$C_{\text{pozos real}} = 4$$

Por lo tanto, para poder extraer la potencia requerida son necesarios cuatro pozos de extracción de fluido geotérmico.

$$\dot{m}_{\text{geotérmico unitario}} = \frac{\dot{m}_{\text{geotérmico}}}{C_{\text{pozos real}}}$$

$$\dot{m}_{fg.\text{unitario}} = 195.6875 \frac{kg}{s}$$

$$h = 1300 \frac{kJ}{kg} \quad P_c = 40 \text{ bar}$$

$$k = 183900$$

Utilizando la siguiente ecuación:

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

$$D = 0.3256 \text{ m} \cong 12.82 \text{ pulgadas}$$

Del cálculo, se selecciona una tubería con un diámetro estándar de 14 pulgadas.

La ficha técnica de la tubería seleccionada se puede encontrar en el Anexo 4.

Seguidamente, se hará un análisis para la mitad de potencia, es decir de 45 MW.

$$\dot{W}_{\text{turbina}} = 45 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{R410a} = \frac{\dot{W}_{\text{turbina}}}{w_{\text{neto real}}} = 391.38 \frac{kg}{s}$$

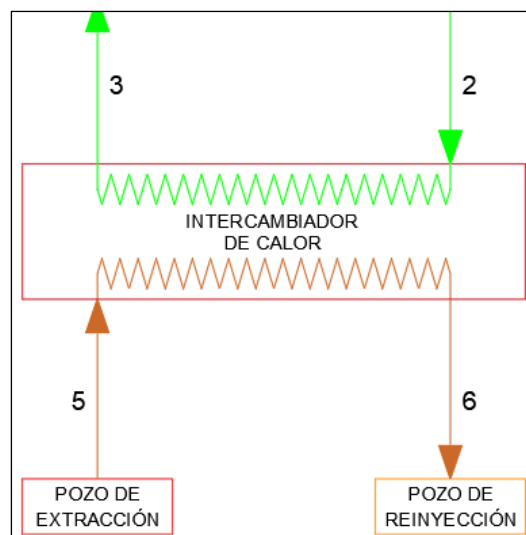


Figura 19. Esquema del intercambiador de calor

Fuente: Elaborado con AutoCAD 2022.

Luego, empleado los datos de temperatura de entrada y salida en el intercambiador de calor, se tuvo que:

$$T_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{2r} = -50.97 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_{p\text{ R410a}} = 1.335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$C_{p\text{ agua}} = 4.2605 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \text{ (Anexo 3)}$$

$$\dot{m}_{\text{R410a}} = 391.38 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se determina el calor en el interior del intercambiador de calor:

$$\dot{Q}_{\text{intercambiador}} = \dot{m}_{\text{R410a}} \cdot C_{p\text{ R410a}} \cdot (T_3 - T_{2r}) = 105\,005.28 \text{ kW}$$

Calculando el flujo másico del fluido geotérmico:

$$\dot{m}_{\text{geotérmico}} = \frac{\dot{Q}_{\text{intercambiador}}}{C_{p\text{ agua}} \cdot (T_5 - T_6)} = 224.06 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{geotérmico}} = 806\,604.02 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 947.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Anexo 3)}$$

$$\dot{V}_{\text{fluido.geotérmico}} = 851.073 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Tabla 13. Resumen de análisis termodinámico

Estado	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Calidad (x)	Fase
1	0.09	-53.75	-18.72	0	Líquido saturado
2	4.00	-51.50	-15.8379	-	Líquido comprimido
2r	4.00	-50.97	-15.1174	-	Líquido comprimido
3	4.00	150	403.64	-	Vapor sobrecalentado
4	0.09	-33.13	271.882	-	Vapor sobrecalentado
4r	0.09	-33.00	391.75	-	Vapor sobrecalentado

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Eficiencia e índice de contaminación ambiental

#### 4.3.1. Eficiencia teórica y real para la central geotérmica

La eficiencia térmica teórica o ideal de la central geotérmica propuesta es:

$$\eta_{\text{térmica ideal}} = \frac{W_{\text{neto ideal}}}{q_{\text{entrada}}}$$

$$\eta_{\text{térmica ideal}} = 0.3072 \times 100\% = 30.72\%$$



La eficiencia térmica real de la central geotérmica propuesta es:

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

$$\eta_{\text{térmica real}} = 0.2741 \times 100\% = 27.41\%$$

#### 4.3.2. Índice de contaminación ambiental para la central geotérmica

En el estudio realizado por Basosi et al. (2020), donde obtuvieron de sus resultados, que índice de contaminación de la energía geotérmica fue 0.0177 kg  $CO_2$  por cada kWh, entonces, el índice de impacto ambiental de generar electricidad utilizando energía geotérmica es:

$$E_{\text{geotérmica}} = 90\,000 \text{ kW} \times 8760 \text{ h} = 788.40 \times 10^6 \text{ kWh}$$

Entonces, se tuvo que:

$$I_{\text{geotérmica}} = 0.0177 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}} \times 788.40 \times 10^6 \text{ kWh}$$

$$I_{\text{geotérmica}} = 13.955 \times 10^6 \text{ kg } CO_2$$

$$I_{\text{geotérmica}} = 13\,955 \text{ t } CO_2$$

Al compararse con una central de Ciclo Rankine tradicional, que tiene un puntaje de 0.250 kg  $CO_2$  por kWh (GenCat, 2022), se tuvo:

$$I_{\text{central convencional}} = 0.250 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}} \times 788.40 \times 10^6 \text{ kWh}$$

$$I_{\text{central convencional}} = 197.10 \times 10^6 \text{ kg } CO_2$$

$$I_{\text{central convencional}} = 197\,100 \text{ t } CO_2$$

Obteniendo una reducción de gases contaminantes de:

$$R_{gc} = I_{\text{central convencional}} - I_{\text{geotérmica}}$$

$$R_{gc} = 197\,100 \text{ t } CO_2 - 13\,955 \text{ t } CO_2$$

$$R_{gc} = 183\,145 \text{ t } CO_2$$

Convirtiendo en porcentaje:

$$R_{gc} (\%) = \frac{183\,145 \text{ t } CO_2}{197\,100 \text{ t } CO_2} \times 100\%$$

$$R_{gc} (\%) = 93\%$$

Del análisis, se logra reducir en 197 100 toneladas de dióxido de carbono la contaminación generada de emplear una central convencional de ciclo Rankine frente a una central geotérmica, esto representa un 93%. Lo que demuestra que utilizar energía geotérmica puede lograr reducir y mitigar el impacto ambiental, con un porcentaje de reducción muy alto.

#### **4.4. Diseño de la central geotérmica**

##### **4.4.1. Equipamiento de central geotérmica**

De acuerdo a los cálculos, se selecciona los equipos necesarios para la central geotérmica, los cuales se detallan seguidamente:

##### **- Turbina de vapor**

Este equipo debe poseer la capacidad de generar la potencia solicitada, es decir, de 90 MW. Entonces, se seleccionó una turbina de la marca Siemens SST-500 para una capacidad de 90 MW. En el Anexo 5 se puede observar la ficha técnica de dicha turbina.

##### **- Generador**

Al seleccionar el generador, se empleó la potencia de la turbina ya que con ello se determina la potencia aparente, tomando en consideración un factor de potencia de 0.85, se obtuvo:

$$S_{generador} = \frac{W_{neta}}{f.p.}$$
$$S_{generador} = \frac{90 \text{ MW}}{0.85} = 105.88 \text{ MVA}$$

El generador debe producir una potencia aparente de 105.88 MVA, pero se debe tener en cuenta de que no opere a su 100% de capacidad, se ha establecido que trabaje al 85% de su capacidad total, por lo tanto, se obtuvo una potencia aparente de:

$$S_{generador\ real} = \frac{S_{generador}}{f.p.}$$

$$S_{generador\ real} = \frac{105.88\ MVA}{0.85} = 124.56\ MVA$$

Entonces, se seleccionó un generador Siemens SGen6-100A-2P de 125 MVA, en el Anexo 6 se puede observar su ficha técnica.

**- Intercambiador de calor**

Dicho equipo debe contener una capacidad de 851.073 m³/h o más, con el fin de entregar el calor requerido en el ciclo binario de potencia, soportando una temperatura máxima de 160 °C o superior y una temperatura mínima de -53.75 °C o inferior.

Por lo cual se seleccionó el intercambiador de calor Alfa Laval CP120. En el Anexo 7 se adjuntó los datos técnicos.

**- Bomba de alimentación**

En primer lugar, se calculó la potencia de la bomba de la siguiente manera:

$$\dot{W}_{bomba} = w_{bomba} \times \dot{m}_{R410a}$$

$$\dot{W}_{bomba} = 3.6026 \frac{kJ}{kg} * 782.75 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{W}_{bomba} = 2\ 819.94\ kW$$

$$\dot{W}_{bomba} = 3780.07\ hp$$

Al no encontrarse una de dicha capacidad o similar, se seleccionó más de una bomba, se tiene una bomba con una potencia de 2800 hp, entonces se tuvo:

$$N_{bombas} = \frac{3780.07\ hp}{2800\ hp} = 1.35$$

Por lo tanto, fueron necesarias 2 bombas de 2800 hp para poder suministrar la potencia necesaria y bombear el flujo de masa en el Ciclo Orgánico Rankine para lograr producir la potencia requerida. En el Anexo 8 se adjuntaron los datos técnicos de dicha bomba.

**- Tuberías**

El sistema de tuberías de los pozos de extracción debe tener un diámetro de

catorce pulgadas, para suministrar el flujo geotérmico requerido. La ficha técnica de la tubería seleccionada se encuentra en el Anexo 9.

Calculando el diámetro de las tuberías:

$$\dot{m}_{\text{pozo unitario}} = 200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$C_{\text{pozos}} = \frac{\dot{m}_{\text{geotérmico}}}{\dot{m}_{\text{pozo unitario}}}$$

$$C_{\text{pozos}} = \frac{391.38 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 1.9569$$

$$C_{\text{pozos real}} = 2$$

Por lo tanto, para poder extraer la potencia requerida son necesarios dos pozos de extracción de fluido geotérmico.

$$\dot{m}_{\text{geotérmico unitario}} = \frac{\dot{m}_{\text{geotérmico}}}{C_{\text{pozos real}}}$$

$$\dot{m}_{\text{fg.unitario}} = 195.69 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h = 1300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad P_c = 40 \text{ bar}$$

$$k = 183900$$

Utilizando la siguiente ecuación:

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

$$D = 0.3256 \text{ m} \cong 12.82 \text{ pulgadas}$$

## 4.5. Análisis económico financiero

### A. Inversión

Se tuvieron los siguientes conceptos:

#### a. Exploración

Se encuentra conformado por estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y demás. Se puede apreciar en la Tabla 14:

Tabla 14. Gastos de exploración (Miles de dólares)

Estudio	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
De Geología	4	100	400
De Geoquímica	4	60	240
De Geofísica	4	200	800
Menores	1	200	250
Perforado de pozos para exploración	4	1 000	4 000
<b>Subtotal</b>			<b>5 690</b>

Fuente: Elaboración propia.

## b. Ejecución de pozos y vaporductos

Dichos gastos se detallan en la Tabla 15:

Tabla 15. Gastos por ejecución de pozos y vaporductos (Miles de dólares)

Ítem	Cantidad	Costo por unidad	Costo Total
Perforado de pozos de producción	7	1 800	12 600
Equipos para pozos	1	1 600	1 600
Ductos de vapor	6	600	3 600
Ductor de agua	1	200	200
<b>Subtotal</b>			<b>18 000</b>

Fuente: Elaboración propia.

## c. Central de producción eléctrica

En la Tabla 16 se aprecian dichos gastos para este concepto.

Tabla 16. Gastos para la central de producción eléctrica (Miles de dólares)

Detalle	Cantidad	Costo por unidad	Costo Total
Máquinas	1	54 000	54 000
Obra Civil	1	4 000	4 000
Instalación y Montaje	1	4 000	4 000
Subestación	1	2 000	2 000
<b>Subtotal</b>			<b>64 000</b>

Fuente: Elaboración propia.

## d. Transmisión

En este concepto, se considera la distancia desde la subestación hasta la central geotérmica, de acuerdo con JICA (2012), la subestación adecuada debe ser la denominada Moquegua, que se encuentra distanciada a 22 km.

En la Tabla 17 se observa la información de los costos de transmisión.

Tabla 17. Gastos por transmisión (Miles de dólares)

Detalle	Cantidad	Costo por unidad	Costo Total
L.T. (Línea de transmisión)	1	12 700	12 700
<b>Subtotal</b>			<b>12 700</b>

Fuente: Elaboración propia.

### e. Subproyectos

Para dicho concepto, se tuvieron en consideración los caminos de acceso que se deben acomodar o mejorar con el propósito de brindar un fácil acceso a la central, también un estudio de impacto ambiental e indemnizaciones. Se puede apreciar en la Tabla 18.

Tabla 18. Gastos de subproyectos (Miles de dólares)

Detalle	Cantidad	Costo por unidad	Costo Total
Acceso a la central	1	400	400
E.I.A. (Est. Impacto Ambiental)	1	1 500	1 500
<b>Subtotal</b>			<b>1 900</b>

Fuente: Elaboración propia.

El resumen de los costos se puede ver en la Tabla 19:

Tabla 19. Resumen de los Gastos de Inversión (Miles de dólares)

Descripción	Subtotal
Exploración	5 690
Ejecución de pozos y vapoductos	13 200
Central de producción eléctrica	63 000
Transmisión	2 200
Subproyectos	2 350
Subtotal	86 440
IGV (18%)	15 559.200
<b>Inversión Total</b>	<b>101 999.20</b>

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, cada kW de la central geotérmica tiene un costo de \$ 1 133.32.

## B. Costos de funcionamiento

### a. Operación y Mantenimiento (O&M)

Se han considerado los siguientes criterios de acuerdo a la estructura disponible en el ámbito internacional y a ciertas características de aplicación referente con el tema estudiado en la actual investigación:

- Mano de obra: Para el buen funcionamiento de una planta geotérmica de 90 MW, se necesita tener en cuenta a 11 personas y para operación y mantenimiento del campo geotérmico se deben considerar unas 22 personas adicionales.
- Mantenimiento: Representa el 1.5% de la inversión calculada en pozos y vaporductos además del concepto por gastos de central de producción eléctrica.
- Administración y gastos generales: Viene a representar el 20% de los gastos en función a la mano de obra y mantenimiento.
- Seguros e impuestos: Tiene una representación del 1.2% de los gastos en pozos y vaporductos, además de la central de producción eléctrica.

Tabla 20. Gastos de O&M (Miles de dólares)

Descripción	Porcentaje	Costo Total
Mano de obra	-	660
Mantenimiento	1.50% (GPV+GCE)	1 143
Administración y Gastos Generales	20.00% (MO+O&M)	360.60
Seguros e Impuestos	1.20% (GPV+GCE)	914.40
<b>Subtotal</b>		<b>3 078.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

## b. Permisos

Tabla 21. Gastos de permisos (Miles de dólares)

Costos en Permisos	
Descripción	Costo Total
Concesión de Explotación	55
Peajes de transmisión	150
Permisos para Centrales Geotérmicas	100
<b>Subtotal</b>	<b>305</b>

Fuente: Elaboración propia.

## C. Ingresos

### a. Venta de energía

La venta de energía se debe a la energía generada e inyectada directamente al SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional), y para saber el monto obtenido de dichas ventas, se consideró los precios en barra de la subestación seleccionada, donde dichos precios son regulados por la Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria (GART). Considerando un tipo de cambio de S/. 3.65 por

cada dólar. Los precios en horas punta (PENP) es de \$ 0.0810 y en horas fuera de punta (PENF) de \$0.0662. Dichos precios se mantienen iguales durante todo el análisis.

### A. Despacho en Base

La central geotérmica posee una potencia de producción de 90 MW, teniendo en cuenta un factor de planta de 0.9, además de 5 horas en punta (HP) y 19 horas fuera de punta (HFP), y 5 días de mantenimiento. La energía generada anualmente es de 699 840 000 kWh, donde en horas punta se tuvo una generación de 145 800 000 kWh y en horas fuera de punta de 554 040 000 kWh.

Tabla 22. Ventas de energía (base)

HP		HFP	
Precio (\$/kWh)	0.0810	Precio (\$/kWh)	0.0662
Energía anual generada (kWh)	145 800 000	Energía anual generada (kWh)	554 040 000
<b>Venta anual de energía (\$)</b>	<b>11 809 800.00</b>	<b>Venta anual de energía (\$)</b>	<b>36 677 448.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Los ingresos por venta de energía generada anualmente son de \$ 48 487 248.00.

### B. Despacho en Media Punta

La central geotérmica posee una potencia de producción de 90 MW, teniendo en cuenta un factor de planta de 0.9, además de 5 horas en punta (HP) y 9 horas fuera de punta (HFP) y 5 días de mantenimiento. La energía generada anualmente es de 699 840 000 kWh, donde en horas punta se tuvo una generación de 145 800 000 kWh y en horas fuera de punta de 262 440 000 kWh.

Tabla 23. Ventas de energía (media punta)

HP (Hora punta)		(HFP) Horas Fuera de Punta	
Precio (\$/kWh)	0.0810	Precio (\$/kWh)	0.0662
Energía anual generada (kWh)	145 800 000	Energía anual generada (kWh)	262 440 000
<b>Venta anual de energía (\$)</b>	<b>11 809 800.00</b>	<b>Venta anual de energía (\$)</b>	<b>17 373 528.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Los ingresos por venta de energía generada anualmente son de \$ 29 183 328.00.

#### b. Venta de Potencia

Dicho precio de potencia en barra (PPN) para la subestación de Moquegua es



de \$ 8.0575/kW-mes. De igual modo, dicho dato se mantuvo constante durante todo el análisis de rentabilidad.

### Despacho en Base

La planta geotérmica propuesta entrega una potencia firme de 88.2 MW, porque se ha considerado una eficiencia de transmisión y luego de la turbina de 98%, esto es, por cada 90 MW entregado, se inyectan 88.2 MW al SEIN. Dicha información se puede apreciar en la Tabla 24:

Tabla 24. Ventas de potencia (base)

<b>Ingreso por venta de potencia</b>	
Precio (\$/kW-mes)	8.0575
Potencia anual firme (kW)	98 000.00
<b>Venta de potencia al año (\$)</b>	<b>9 475 620.00</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

### Despacho en Media Punta

La planta geotérmica propuesta entrega una potencia firme de 51.45 MW, porque se ha considerado una eficiencia de transmisión y luego de la turbina de 98%, esto es, por cada 90 MW entregado, se inyectan 51.45 MW al SEIN. Dicha información se puede apreciar en la Tabla 25:

Tabla 25. Ventas de potencia (media punta)

<b>Ingreso por venta de potencia</b>	
Precio (\$/kW-mes)	8.0575
Potencia anual firme (kW)	57 170.00
<b>Venta de potencia al año (\$)</b>	<b>5 527 767.30</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 26. Análisis de rentabilidad de la planta geotérmica propuesta (despacho base)

Año	Inversión	O&M	Permisos	Venta de energía	Venta de Potencia	Ingreso Bruto	Impuesto a la Renta	Ingreso Neto	Ingreso Neto Actualizado
0	\$ -101,999,200							\$ -101,999,200	\$ -101,999,200
1		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 36,736,450	\$ 33,703,165
2		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 35,323,509	\$ 29,731,091
3		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 33,964,913	\$ 26,227,145
4		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 32,658,570	\$ 23,136,154
5		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 31,402,471	\$ 20,409,452
6		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 30,194,684	\$ 18,004,103
7		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 29,033,350	\$ 15,882,237
8		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 27,916,682	\$ 14,010,442
9		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 26,842,964	\$ 12,359,246
10		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 25,810,542	\$ 10,902,652
11		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 24,817,829	\$ 9,617,724
12		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 23,863,297	\$ 8,484,231
13		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 22,945,478	\$ 7,484,325
14		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 22,062,960	\$ 6,602,263
15		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 21,214,384	\$ 5,824,156
16		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 20,398,446	\$ 5,137,752
17		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 19,613,891	\$ 4,532,244
18		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 18,859,510	\$ 3,998,098
19		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 18,134,145	\$ 3,526,904
20		\$ 3,078,000	\$ 305,000	\$ 48,487,248	\$ 9,475,620	\$ 54,579,868	\$ 16,373,960	\$ 17,436,677	\$ 3,111,242

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Análisis de rentabilidad de la planta geotérmica propuesta (despacho 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	\$ -101,999,200							\$ -101,999,200	\$ -101,999,200
1		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 21,914,910	\$ 20,105,422
2		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 21,072,029	\$ 7,735,905
3		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 20,261,566	\$ 15,645,647
4		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 19,482,275	\$ 13,801,735
5		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 18,732,957	\$ 12,175,137
6		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 18,012,459	\$ 10,740,241
7		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 17,319,672	\$ 9,474,454
8		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 16,653,531	\$ 8,357,846
9		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 16,013,010	\$ 7,372,835
10		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 15,397,125	\$ 6,503,912
11		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 14,804,928	\$ 5,737,396
12		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 14,235,508	\$ 5,061,217
13		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 13,687,988	\$ 4,464,730
14		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 13,161,527	\$ 3,938,540
15		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 12,655,315	\$ 3,474,365
16		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 12,168,572	\$ 3,064,895
17		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 11,700,550	\$ 2,703,683
18		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 11,250,529	\$ 2,385,042
19		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 10,817,816	\$ 2,103,953
20		\$ 1,846,800	\$ 305,000	\$ 29,183,328	\$ 5,527,767	\$ 32,559,295	\$ 9,767,789	\$ 10,401,746	\$ 1,855,993

Fuente: Elaboración propia.

El resumen de la información, se puede apreciar en la Tabla 28 (base) y en la Tabla 29 (media punta).

Tabla 28. *Indicadores de rentabilidad (base)*

Inversión	<b>- \$ 101 999 200.00</b>
Ingreso total neto actualizado	\$ 262 684 624.00
<b>VAN (20 años)</b>	<b>\$ 160 685 424.00</b>
<b>TIR</b>	<b>32.11%</b>
<b>Payback (años)</b>	<b>3.53</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 29. *Indicadores de rentabilidad (media punta)*

Inversión	<b>- \$ 101 999 200.00</b>
Ingreso total neto actualizado	\$ 156 702 948.00
<b>VAN (20 años)</b>	<b>\$ 54 703 748.00</b>
<b>TIR</b>	<b>17.23%</b>
<b>Payback (años)</b>	<b>7.28</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, de los resultados de despacho en base se obtuvo un Valor Actual Neto de \$ 160 685 624, con una Tasa Interna de Retorno de 32.11% y un Payback de 3.53 años, lo que demostró la alta rentabilidad del proyecto para dicho despacho.

Y de los resultados de despacho en media punta se obtuvo un Valor Actual Neto de \$ 54 703 748, con una Tasa Interna de Retorno de 17.23% y un Payback de 7.28 años, lo que demostró la buena rentabilidad del proyecto para dicho despacho, pero en menor al despacho en base.

La tasa de descuento considerada para el presente proyecto fue de 9% anual y una inflación de 4% anual, esto debido a la pandemia de la COVID-19, que actualmente sigue generando inflación en la economía del mundo.

## V. DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos, en referencia a lo determinado por Muslihudin et al. (2022), es importante el uso de la energía geotérmica para mitigar y reducir el impacto ambiental, además de que la propuesta de una central geotérmica es atractivamente rentable y viable en el tiempo, donde la recuperación de la inversión inicial en el tiempo es en el corto o mediano plazo. Dicho autor determinó que en Indonesia se tiene el potencial geotérmico suficiente para abastecer de energía eléctrica al país, y que solo se a empleado una mínima fracción de dicho potencial.

En la investigación realizada por Oyekale & Emagbetere (2022), donde efectuaron una revisión sobre las evaluaciones en el ciclo de vida exergético y convencional de las centrales geotérmicas que emplean Ciclo Rankine Orgánico (ORC) que explotan los recursos geotérmicos a baja temperatura, donde indicaron la importancia de emplear dicho Ciclo Rankine Orgánico para el desarrollo de la futura infraestructura energética y que debe ser ampliamente reconocido, debido en gran parte a su capacidad para explotar fuentes de energía térmica de baja temperatura, como el calor residual industrial y los recursos de energía renovable, además de que su ciclo de vida es alto y permite recuperar la inversión en corto tiempo, demostrando su alta rentabilidad, fiabilidad y además de que se logra reducir la contaminación ambiental al no quemarse combustibles fósiles.

Zuffi et al. (2022) manifiestan que la geotermia es una energía renovable muy prometedora que, a diferencia de las energías renovables variables, es independiente de las condiciones externas/climáticas y puede cubrir tanto la demanda de energía como la de calor. No obstante, a pesar de estas características ventajosas, las plantas de energía geotérmica tradicionales pueden tener impactos ambientales no despreciables: estos van desde emisiones de contaminantes o gases de efecto invernadero hasta el uso relevante de productos químicos, energía y otros recursos durante el desarrollo de la central (pozos), operación y ejecución. Pero que considerando ciertos aspectos, esto se puede evitar de la mejor manera y haciendo que se convierta en una central con el potencial suficiente para suministrar de energía eléctrica a todo el país. Esto también representa una actualización sobre la práctica actual documentada en la literatura técnica, que a menudo aplica diferentes métodos (por ejemplo, RECIPE, ILCD, CML o Eco-

Indicator) que están siendo reemplazados.

En Chile, en el artículo que elaboraron Tranamil et al. (2022) respecto a la evaluación sobre hibridación de una central geotérmica existente acoplando un sistema CSP para aumentar la producción de energía, mencionaron que la energía solar concentrada (CSP) y los sistemas de energía geotérmica se describen como dos de las tecnologías más prometedoras para la generación de electricidad sostenible y confiable. Varios estudios en la literatura técnica han señalado que la hibridación de las fuentes de energía solar y geotérmica podría conducir a una reducción del costo nivelado de energía (LCOE) de los sistemas geotérmicos, así como a mejorar el factor de capacidad de los sistemas CSP. Sin embargo, la literatura técnica muestra que la integración de colectores solares térmicos no presenta un impacto positivo en todos los escenarios analizados. Pero que si se consideran aquellos aspectos relevantes esto se puede solucionar sin generar más prejuicios, además de que el uso de la energía ha demostrado tener el potencial necesario para cubrir la demanda energética adicionalmente de ayudar a reducir de forma considerable la contaminación ambiental generada por centrales convencionales de ser el caso. Los resultados mostraron que los esquemas híbridos permiten una reducción del LCOE de una planta geotérmica autónoma en alrededor de 10 USD/MWh, aumentando la competitividad del sistema geotérmico.

En Italia, Ceglia et al. (2021) elaboraron un artículo referente a una central geotérmica para microtrigeneración para una comunidad de energía inteligente, en la localidad de Ischia. Las mejoras para la sostenibilidad de las islas sujetas a fuertes presiones antropogénicas podrían obtenerse mediante soluciones innovadoras para el suministro de energía mediante el uso de fuentes locales de energía renovable. Los resultados obtenidos en la presente investigación demostraron que el uso de un Ciclo Orgánico Rankine permite optimizar la producción de electricidad, tanto para suministrar energía eléctrica como para las bombas de calor, los resultados destacan que el uso del sistema propuesto en lugar del tradicional permite evitar 29,9 toneladas por año de emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, este sistema propuesto garantiza el funcionamiento insular de la comunidad explotando la fuente local de energía renovable y mejorando la independencia energética.

En Italia, Basosi et al. (2020) elaboraron los inventarios del ciclo de vida útil empleando data del tipo primaria. Al analizar, se obtuvo como resultado que tienen como característica un extenso portafolio en relación a los indicadores medioambientales utilizando la metodología ILCD 2011 Midpoint+ y ReCiPe 2016. Además, se demostró que tenían un perfil bueno sobre lo ecológico de las centrales geotérmicas en relación con diferentes centrales de energía tipo renovable y definitivamente una mejora en los avances sobre la matriz energética. Respecto al puntaje Eco Point, se determinó que la energía eólica era la tecnología más sustentable, con 0.0012 Ecopuntos/kWh, y la energía geotérmica, obtuvo un puntaje de 0.0177 Ecopuntos/kWh y para una central fotovoltaica, que obtuvo 0.0087 Ecopuntos/kWh, donde todos los puntajes están por debajo del mix energético nacional, que fue de 0.1240 Ecopuntos/kWh. Dicha información contrasta con los resultados obtenidos en la presente investigación, demostrando la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar una central geotérmica, que además posee el potencial suficiente para brindar energía eléctrica a todo el país y de manera ecoamigable.

Nuevamente, en Italia, Sbrana et al. (2021) desarrollaron su artículo donde indican que la energía geotérmica es una energía renovable clave para Italia, con una producción eléctrica anual de 6,18 TWh. El futuro de la energía geotérmica tiene que ver con la claridad sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de las centrales eléctricas y los contextos geológicos donde el CO<sub>2</sub> se produce de forma natural. El área volcánico-geotérmica del Monte Amiata (AVGA) es un laboratorio natural formidable para investigar los roles relativos de la desgasificación natural de CO<sub>2</sub> y las emisiones de CO<sub>2</sub> de las plantas de energía geotérmica (GPP). Y de igual manera, se contrasta la información con la obtenida en la presente investigación, donde se logró demostrar que la energía geotérmica es importante para mejorar la matriz energética del país además de reducir de manera significativa la contaminación ambiental. El flujo natural de gas del suelo es alto, independientemente de la ocurrencia de GPP en el área, y el presupuesto para el flujo de gas natural difuso es alto con respecto a las emisiones de gas de la planta de energía. Además, el CO<sub>2</sub> emitido por las centrales eléctricas parece reducir la cantidad de emisiones naturales debido al flujo de gas operado por las centrales eléctricas. Durante el ciclo de vida de los GPP, las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se reducen aún más

debido a la reinyección de fluidos acuosos libres de gas en los reservorios geotérmicos. Por lo tanto, los GPP actualmente en funcionamiento en AVGA producen energía a un nivel de cero emisiones.

Con respecto a la investigación realizada por Quispe Huayta (2021), donde emplearon un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) del tipo binario, que permitió aprovechar las aguas termales de la ciudad en estudio. De forma similar a dicha investigación, donde se empleó el Isobutano como fluido de trabajo, por sus excelentes propiedades físicas y termodinámicas, como el R410a empleado en la presente investigación, por poseer características termodinámicas y físicas bastante atractivas. El flujo de masa para el Isobutano fue de 238 928.40 kg/h y para el flujo geotérmico de 583 578 kg/h. La central tuvo una potencia de generación de 1.5 MW, y una eficiencia de la central de 5.623%. Para el caso de la presente investigación, donde la potencia de generación fue de 90 MW, con un flujo de masa de R410a de 2 817 900 kg/h y de fluido geotérmico de 1 613 196 kg/h, datos mucho mayores a los obtenidos por dicho autor en su investigación debido a que la potencia de generación es mucho más elevada. La eficiencia térmica teórica del Ciclo Orgánico Rankine es de 30.72% y la eficiencia térmica real es de 27.41%, y esta disminución se debe a que se tuvieron en cuenta las eficiencias isoentrópicas de la bomba y turbina, y es de esperarse debido a que el ciclo orgánico Rankine permite optimizar la generación de energía eléctrica aunque difiere bastante con los resultados obtenidos por el autor mencionado, pudiendo deberse a que empleó ciertos parámetros que no le permitieron aprovechar al máximo el potencial del campo geotérmico; y el índice de contaminación de la central geotérmica es de 13 955 toneladas de dióxido de carbono.



## VI. CONCLUSIONES

- Se concluye que, del análisis comparativo entre los fluidos orgánicos de trabajo seleccionados, el que posee las mejores propiedades y es ecoamigable con el medio ambiente y tiene un poder calorífico elevado es el refrigerante R410a, donde la tabla de propiedades termodinámicas se aprecia en el Anexo1.
- Se concluye que, el flujo de masa del refrigerante R410a es de 782.75 kg/s para generar la potencia requerida que es de 90 MW en el Ciclo Orgánico Rankine, y el flujo de masa del fluido geotérmico es de 448.11 kg/s para cumplir con los requerimientos energéticos en el intercambiador de calor.
- Se concluye que, la eficiencia térmica teórica del Ciclo Orgánico Rankine es de 30.72% y la eficiencia térmica real es de 27.41%, y esta disminución se debe a que se tuvieron en cuenta las eficiencias isoentrópicas de la bomba y turbina; y el índice de contaminación de la central geotérmica es de 13 955 toneladas de dióxido de carbono.
- Se concluye que, la inversión total para la central geotérmica es de \$ 101 999 200.00 y del análisis de rentabilidad para despacho en base se obtuvo un Valor Actual Neto de \$ 160 685 424.00, una Tasa Interna de Retorno de 32.11% y un Payback de 3.53 años. Demostrando que el proyecto de una central geotérmica es viable y rentable económicamente.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- De los fluidos orgánicos de trabajo empleados, se puede hacer un análisis por separado, es decir, uno por uno en el Ciclo Orgánico Rankine y así tener un enfoque más preciso de todos ellos.
- El flujo de masa cambiará dependiendo del fluido orgánico empleado, por lo que se complementará la recomendación anterior.
- La eficiencia térmica teórica y real de igual modo cambiará dependiendo del fluido orgánico de trabajo empleado, complementando las recomendaciones anteriores.

## REFERENCIAS

- 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.
- Alfaro, C., Rueda Gutiérrez, J. B., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2021). Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102169>
- Ball, P. J. (2021). A Review of Geothermal Technologies and Their Role in Reducing Greenhouse Gas Emissions in the USA . *Journal of Energy Resources Technology*, 143(1), 1-15. <https://doi.org/10.1115/1.4048187>
- Barasa Kabeyi, M. J., & Akanni Olanrewaju, O. (2022). Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review. *Energy Strategy Reviews*, 39, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100735>
- Basosi, R., Bonciani, R., Frosali, D., Manfreda, G., Parisi, M. L., & Sansone, F. (2020). Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems. *Sustainability*, 12(7), 1-29. <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).
- Bina, S. M., Jalilinasrabad, S., Fujii, H., & Agung Pambudi, N. (2018). Classification of geothermal resources in Indonesia by applying exergy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.018>
- Bing Cool. (2023). *R12 Refrigerante con alta pureza*. <https://es.refrigerant-supplier.com/hfc-refrigerant/1132790.html>
- 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.
- Ceglia, A., Marrasso, E., Roselli, C., & Sasso, M. (2021). A Micro-trigeneration Geothermal Plant for a Smart Energy Community: The Case Study of a Residential District in Ischia . *Earth and Environmental Science*, 690, 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/690/1/012051>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and Mass Transfer* (6ta ed.). United States of America: Mc Graw Hill.
- Chaer Ingeniería. (15 de julio de 2020). *Mitigación de un impacto ambiental*. <https://chaer.com.ar/mitigacion/#:~:text=Se%20define%20como%20medidas%20de,compensaci%C3%B3n%20de%20impactos%20ambientales%20negativos>.
- Colucci, V., Manfrida, G., Mendecka, B., Talluri, L., & Zuffi, C. (2021). LCA and Exergo-Environmental Evaluation of a Combined Heat and Power Double-Flash Geothermal Power Plant. *Sustainability*, 13(4), 1-22. <https://doi.org/10.3390/su13041935>
- Conforempresarial. (30 de marzo de 2020). *Gas R600a*. <https://www.conforempresarial.com/refrigeracion-con-hidrocarburos-propano-r290-isobutano-r-600a/>
- Corte Juela, E. C., & Flores Suqui, C. A. (2015). *Estudio de los parámetros de operación de un refrigerador doméstico que opera con refrigerante R600a*. Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- 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.

- Daniels, S., Martensen, H., Schoeters, A., Van Den Berghe, W., Papadimitriou, E., Ziakopoulos, A., Kaiser, S., Aigner-Breuss, E., Soteropoulos, A., Wijnen, W., Weijermars, W., Carnis, L., Elvik, R., & Perez, O. M. (2019). A systematic cost-benefit analysis of 29 road safety measures. *Accident Analysis and Prevention*, 133, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105292>
- 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>
- DiPippo, R. (2022). Pathé geothermal power plant, Hidalgo, Mexico: A comprehensive retrospective assessment of the first plant of its kind in the Americas. *Geothermics*, 100, 102-285. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102285>
- Fiaschi, D., Manfrida, G., Mendecka, B., Tosti, L., & Parisi, M. L. (2021). A Comparison of Different Approaches for Assessing Energy Outputs of Combined Heat and Power Geothermal Plants. *Sustainability*, 13(4527), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su13084527>
- Freeze Refrigerant. (2023). *Refrigerant R601a Gas*. <http://www.freezeref.com/index.php/products/refrigerant-r601a-gas/>
- Frikko. (25 de marzo de 2020). *Qué es el gas refrigerante R410 para aires acondicionados*. <https://www.frikko.com/noticias/que-es-el-gas-refrigerante-r410/>
- García Zertuche, M. F., Sandoval Rangel, A., Robledo Torres, V., Benavides Mendoza, A., Robledo Olivo, A., & Cabrera de la Fuente, M. (2021). Rentabilidad y rendimiento agronómico de lechuga acuapónica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 119-130. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2942>
- Gasica. (2020). *Gas R12*. <https://gasica.es/gas-r12/#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20del%20gas%20R%2D12&text=Es%20m%C3%A1s%20pesado%20que%20el,superar%20el%200%2C0004>

%25.

GenCat. (25 de abril de 2022). *Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico*.

[https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/)

Gonzales, F. (2022). *R12 Refrigerante Ciclo de trabajo*. Studocu: <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-mayor-de-san-simon/refrigeracion-y-aire-acondicionado/r-12-refrigerante-r-12-ciclo-de-trabajo/14650808>

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.

Günther, M. (2018). Challenges of a 100% renewable energy supply in the Java-Bali Grid. *International Journal Technology*, 2, 257-266. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i2.1027>

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>.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativamente, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill Education.

Hidalgo Benites, L. E., Villalba Condori, K. O., Arias Chávez, D., Berrios Espezua, M., & Cano, S. (2021). Aula invertida en una plataforma virtual para el desarrollo de competencias. Caso de estudio: curso de investigación aplicada. *Campus Virtuales*, 10(2), 185-193.

- IRENA. (4 de Agosto de 2021). *Energía Geotérmica*. Agencia Internacional de Energías Renovables: <https://www.irena.org/geothermal>
- Karlsdottir, M. R., Heinonen, J., Palsson, H., & Palsson, O. P. (2020). Life cycle assessment of a geothermal combined heat and power plant based on high temperature utilization. *Geothermics*, *84*, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101727>
- Kavadias , K. A., Alexopoulos, P., & Charis, G. (2019). Techno-economic evaluation of geothermal-solar power plant in Nisyros island in Greece. *Energy Procedia*, *159*, 136-141. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.031>
- Kjeld, A., Bjarnadottir, H. J., & Olafsdottir, R. (2022). Life cycle assessment of the Theistareykir geothermal power plant. *Geothermics*, *105*, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102530>
- Kousky, C., Ritchie, L., Tierney, K., & Lingle, B. (2019). Return on investment analysis and its applicability to community disaster preparedness activities: Calculating costs and returns. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *41*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101296>
- Marty, F., Serra, S., Sochard, S., & Reneaume, J. M. (2019). Exergy analysis and optimization of a combined heat and power geothermal plant. *Energies*, *12*(1175), 1-22. <https://doi.org/10.3390/en12061175>
- Matuszewska, D., Kuta, M., & Górski, J. (2019). The environmental impact of renewable energy technologies shown in case of ORC-Based Geothermal Power Plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *214*, 1-11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012142>
- Michea, S., Muñoz, Á., Zárate, X., Alvarado, N., Inostroza, N., Reyes Bozo, L., Schaffeld, G., Valenzuela, M. L., Linares Flores, C., & Gómez, T. (2019). ENERGÍAS que mueven al mundo. *Línea Editorial Aprende*, *1*(1), 1-122. <https://doi.org/10.32457/ISBN9789568454470472019-ED1>
- Millstein, D., Dobson, P., & Jeong, S. (2021). The Potential to Improve the Value of U.S. Geothermal Electricity Generation Through Flexible Operations. *Journal of Energy Resources Technology*, *143*, 1-9. <https://doi.org/10.1115/1.4048981>

- Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Balance Nacional de Energía 2018*. Lima: MINEM.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of Engineering thermodynamics* (9na ed.). United States of America: Wiley.
- Moya, D., Aldás, C., & Kaparaju, P. (2018). Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 889-901. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.047>
- Muslihudin, M., Rabiatul Adawiyah, W., Hendarto, E., Damaryanti, R., & Fadil Ramadhan, M. (2022). Environmental Constraints in Building Process a Sustainable Geothermal Power Plant on The Slopes of Slamet Mount, Central Java, Indonesia. *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 9(2), 300-309. <https://doi.org/10.5109/4793669>
- Nasruddin, N., Nasution, S., Aisyah, N., Surachman, A., & Satrio Wibowo, A. (2018). Exergy analysis and exergoeconomic optimization of a binary cycle system using a multi objective genetic algorithm. *International Journal of Technology*, 2, 275-286. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i2.1040>
- Oyekale, J., & Emagbetere, E. (2022). A review of conventional and exergetic life cycle assessments of organic Rankine cycle plants exploiting various low-temperature energy resources. *Heliyon*, 8, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09833>
- 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>
- Parisi, M. L., Douziech, M., Tosti, L., Pérez López, P., Mendecka, B., Ulgiati, S., Fiaschi, D., Manfrida, G., & Blanc, I. (2020). Definition of LCA Guidelines in the Geothermal Sector to Enhance Result Comparability. *Energies*, 13(3534), 1-18. <https://doi.org/10.3390/en13143534>
- Parlamento Europeo. (29 de octubre de 2010). *Gas refrigerante R12*. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-7-2010-9424\\_ES.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-7-2010-9424_ES.html)
- Paulillo, A., Striolo, A., & Lettieri, P. (2019). The environmental impacts and the



- carbon intensity of geothermal energy: A case study on the Hellisheiði plant. *Environment International*, 133, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105226>
- Pochteca Perú. (30 de septiembre de 2021). *Gas Refrigerante R-134a Características*. <https://peru.pochteca.net/caracteristicas-del-gas-refrigerante-r-134a/>
- 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>
- 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.
- Qurrahman, A. H., Wilopo, W., Susanto, S. P., & Murti Petrus, H. T. (2021). Energy and Exergy Analysis of Dieng Geothermal Power Plant. *International Journal of Technology*, 12(1), 175-185. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i1.4218>
- Saunders Vásquez, A. (2018). *La Energía Geotérmica*. Cuba: Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía.
- Sbrana, A., Lenzi, A., Paci, M., Gambini, R., Sbrana, M., Ciani, V., & Marianelli, P. (2021). Analysis of Natural and Power Plant CO<sub>2</sub> Emissions in the Mount Amiata (Italy) Volcanic–Geothermal Area Reveals Sustainable Electricity Production at Zero Emissions. *Energies*, 14(15), 1-22. <https://doi.org/10.3390/en14154692>
- Scalofríos. (2023). *Diagrama de Mollier*. <http://www.scalofrios.es/frio/diagramademollier.htm>
- Schmerler Vainstein, D., Velarde Sacio, J. C., Rodríguez González, A., & Solís Sosa, B. (2019). *Energías Renovables: Experiencia y Perspectivas en la Ruta del Perú hacia la Transición Energética*. Osinergmin.
- Sirloong Chemical. (06 de enero de 2019). *Isopentane R601a para la síntesis*

orgánica. <http://www.sirloonggas.com/info/isopentane-r601a-for-organic-synthesis-33013814.html>

Solquimia. (2023). *Refrigerantes – Climatización*. Suministro y carga de gases refrigerantes para climatización: <http://www.solquimia.com/refrigerantes-climatizacion/>

Tekko. (2022). *Gas refrigerante R410a*. <https://tekkoperu.com/producto/gas-refrigerante-r410a/>

Termoclima Andina SAC. (2023). *Refrigerante R134a x 13.6 kg*. <https://termoclimasac.com/producto/refrigerante-r134a-x-13-6-kg/>

Tim, E., Florian, H., & Dieter, B. (2019). Transient simulation of geothermal combined heat and power generation for a resilient energetic and economic evaluation. *Energies*, 12(894), 1-16. <https://doi.org/10.3390/en12050894>

Tranamil Maripe, Y., Cardemil, J. M., Escobar, R., Morata, D., & Samiento Laurel, C. (2022). Assessing the Hybridization of an Existing Geothermal Plant by Coupling a CSP System for Increasing Power Generation. *Energies*, 15(1961), 1-28. <https://doi.org/10.3390/en15061961>

Zhejiang NOF Chemical Co. Ltd. (2023). *Introducción al AC R600a, beneficios, ventajas y desventajas del R600a*. <https://es.frioflor.com/Introducci%C3%B3n-al-AC-R600a-beneficios-ventajas-y-desventajas-del-R600a-pd48472474.html>

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>

Zuffi, C., Manfrida, G., Asdrubali, F., & Talluri, L. (2022). Life cycle assessment of geothermal power plants: A comparison with other energy conversion technologies. *Geothermics*, 104, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102434>

## ANEXOS

### Anexo 1: Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
<b>Independiente</b> Mitigación de impacto ambiental	Son el conjunto de medidas o acciones que permiten prevenir, controlar, atenuar, restaurar y/o compensar los impactos ambientales negativos (Chaer Ingeniería, 2020).	Se calcula de acuerdo a la generación de energía eléctrica que se obtiene del diseño de la central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo.	Contaminación ambiental	- Índice de contaminación ambiental	De razón.
<b>Independiente</b> Diseño de central geotérmica	Una central geotérmica 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 (Kavadias et al., 2019).	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 operación y funcionamiento  Costos de Inversión  Costos de funcionamiento  Ingresos  Análisis de rentabilidad  Impacto ambiental	- Temperatura - Presión - Flujo de masa - Potencia Activa - Energía generada - Potencia Aparente - Rendimiento - Factor de carga  - Costos de Exploración - Costos de construcción de pozos y vapor ductos - Costos de subestación - Costos de transmisión - Costos de subproyectos  - Costo de O&M - Costo de permisos  - Venta por concepto de energía - Venta por concepto de potencia  - Valor Actual Neto (VAN) - Tasa Interna de Retorno (TIR) - Tiempo de retorno de la inversión - Relación Beneficio/Costo  - Índice de impacto ambiental	De razón.

## 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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /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)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (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 <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg-K)	$v$ (m <sup>3</sup> /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 3 – Propiedades termodinámicas del agua saturada

**TABLA A-9**

Propiedades del agua saturada

Temp., $T$ °C	Presión de saturación, $P_{sat}$ , kPa	Densidad, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>		Entalpía de vaporización, $h_{fg}$ , kJ/kg	Calor específico, $c_p$ , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, $\mu$ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, $\beta$ 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	$1.792 \times 10^{-3}$	$0.922 \times 10^{-5}$	13.5	1.00	$-0.068 \times 10^{-3}$
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	$1.519 \times 10^{-3}$	$0.934 \times 10^{-5}$	11.2	1.00	$0.015 \times 10^{-3}$
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	$1.307 \times 10^{-3}$	$0.946 \times 10^{-5}$	9.45	1.00	$0.733 \times 10^{-3}$
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	$1.138 \times 10^{-3}$	$0.959 \times 10^{-5}$	8.09	1.00	$0.138 \times 10^{-3}$
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	$1.002 \times 10^{-3}$	$0.973 \times 10^{-5}$	7.01	1.00	$0.195 \times 10^{-3}$
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	$0.891 \times 10^{-3}$	$0.987 \times 10^{-5}$	6.14	1.00	$0.247 \times 10^{-3}$
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	$0.798 \times 10^{-3}$	$1.001 \times 10^{-5}$	5.42	1.00	$0.294 \times 10^{-3}$
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	$0.720 \times 10^{-3}$	$1.016 \times 10^{-5}$	4.83	1.00	$0.337 \times 10^{-3}$
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	$0.653 \times 10^{-3}$	$1.031 \times 10^{-5}$	4.32	1.00	$0.377 \times 10^{-3}$
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	$0.596 \times 10^{-3}$	$1.046 \times 10^{-5}$	3.91	1.00	$0.415 \times 10^{-3}$
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	$0.547 \times 10^{-3}$	$1.062 \times 10^{-5}$	3.55	1.00	$0.451 \times 10^{-3}$
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	$0.504 \times 10^{-3}$	$1.077 \times 10^{-5}$	3.25	1.00	$0.484 \times 10^{-3}$
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	$0.467 \times 10^{-3}$	$1.093 \times 10^{-5}$	2.99	1.00	$0.517 \times 10^{-3}$
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	$0.433 \times 10^{-3}$	$1.110 \times 10^{-5}$	2.75	1.00	$0.548 \times 10^{-3}$
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	$0.404 \times 10^{-3}$	$1.126 \times 10^{-5}$	2.55	1.00	$0.578 \times 10^{-3}$
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	$0.378 \times 10^{-3}$	$1.142 \times 10^{-5}$	2.38	1.00	$0.607 \times 10^{-3}$
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	$0.355 \times 10^{-3}$	$1.159 \times 10^{-5}$	2.22	1.00	$0.653 \times 10^{-3}$
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	$0.333 \times 10^{-3}$	$1.176 \times 10^{-5}$	2.08	1.00	$0.670 \times 10^{-3}$
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	$0.315 \times 10^{-3}$	$1.193 \times 10^{-5}$	1.96	1.00	$0.702 \times 10^{-3}$
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	$0.297 \times 10^{-3}$	$1.210 \times 10^{-5}$	1.85	1.00	$0.716 \times 10^{-3}$
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	$0.282 \times 10^{-3}$	$1.227 \times 10^{-5}$	1.75	1.00	$0.750 \times 10^{-3}$
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	$0.255 \times 10^{-3}$	$1.261 \times 10^{-5}$	1.58	1.00	$0.798 \times 10^{-3}$
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	$0.232 \times 10^{-3}$	$1.296 \times 10^{-5}$	1.44	1.00	$0.858 \times 10^{-3}$
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	$0.213 \times 10^{-3}$	$1.330 \times 10^{-5}$	1.33	1.01	$0.913 \times 10^{-3}$
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	$0.197 \times 10^{-3}$	$1.365 \times 10^{-5}$	1.24	1.02	$0.970 \times 10^{-3}$
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	$0.183 \times 10^{-3}$	$1.399 \times 10^{-5}$	1.16	1.02	$1.025 \times 10^{-3}$
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	$0.170 \times 10^{-3}$	$1.434 \times 10^{-5}$	1.09	1.05	$1.145 \times 10^{-3}$
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	$0.160 \times 10^{-3}$	$1.468 \times 10^{-5}$	1.03	1.05	$1.178 \times 10^{-3}$
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	$0.150 \times 10^{-3}$	$1.502 \times 10^{-5}$	0.983	1.07	$1.210 \times 10^{-3}$
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	$0.142 \times 10^{-3}$	$1.537 \times 10^{-5}$	0.947	1.09	$1.280 \times 10^{-3}$
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	$0.134 \times 10^{-3}$	$1.571 \times 10^{-5}$	0.910	1.11	$1.350 \times 10^{-3}$
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	$0.122 \times 10^{-3}$	$1.641 \times 10^{-5}$	0.865	1.15	$1.520 \times 10^{-3}$
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	$0.111 \times 10^{-3}$	$1.712 \times 10^{-5}$	0.836	1.24	$1.720 \times 10^{-3}$
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	$0.102 \times 10^{-3}$	$1.788 \times 10^{-5}$	0.832	1.35	$2.000 \times 10^{-3}$
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	$0.094 \times 10^{-3}$	$1.870 \times 10^{-5}$	0.854	1.49	$2.380 \times 10^{-3}$
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	$0.086 \times 10^{-3}$	$1.965 \times 10^{-5}$	0.902	1.69	$2.950 \times 10^{-3}$
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	$0.078 \times 10^{-3}$	$2.084 \times 10^{-5}$	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	$0.070 \times 10^{-3}$	$2.255 \times 10^{-5}$	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	$0.060 \times 10^{-3}$	$2.571 \times 10^{-5}$	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	$0.043 \times 10^{-3}$	$4.313 \times 10^{-5}$	—	—	—

**Nota 1:** La viscosidad cinemática  $\nu$  y la difusividad térmica  $\alpha$  se pueden calcular a partir de sus definiciones,  $\nu = \mu/\rho$  y  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$ . Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

**Nota 2:** La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

**Fuente:** Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

## Anexo 4 – Ficha técnica de 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	Espesor Nominal	Peso	Espesor Nominal	Peso	Espesor Nominal	Peso	Espesor Nominal	Peso
Pulg.	mm	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	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

## SST-500 Steam Turbine

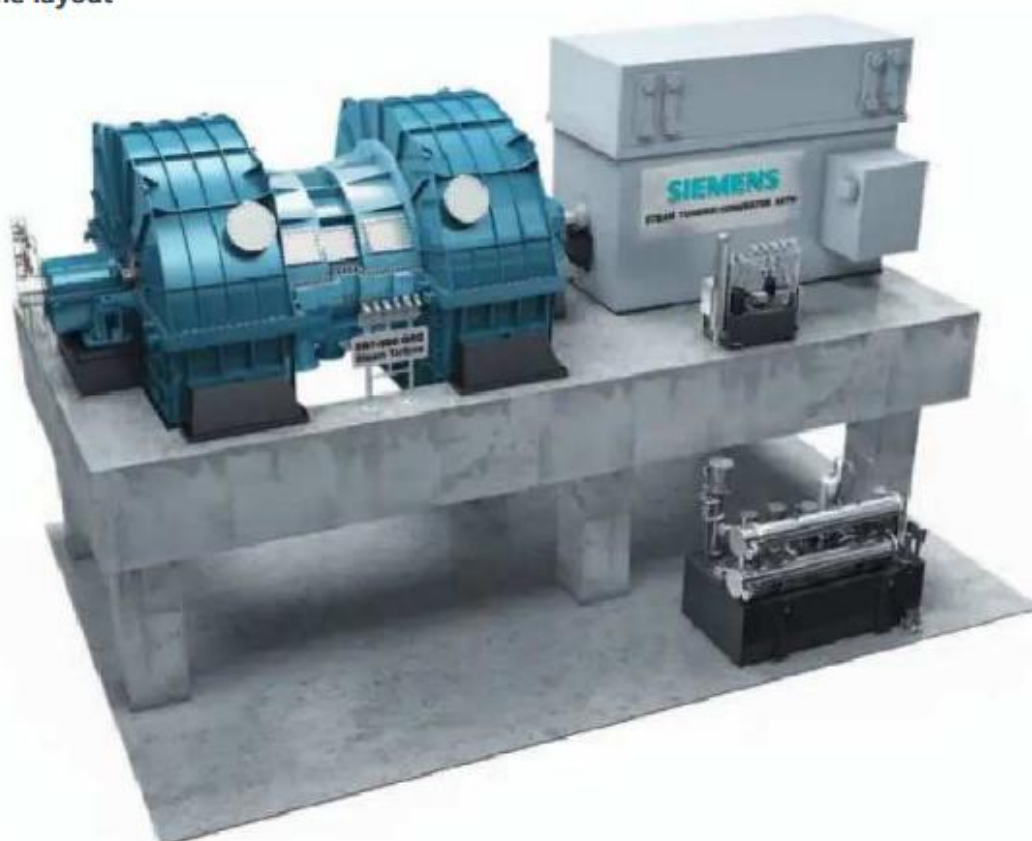
### Overview

The SST-500 is a single casing, double flow condensing turbine, which can be used as an entire drive or as the low-pressure module of a multiple-casing turboset, directly driven or geared. The turbine is ideal for the handling of large steam volume flows and has the flexibility to operate over a wide range of speed and power.

The SST-500 represents a solution based on long experience of industrial steam turbines, covering industrial applications such as:

- Pump drive (e.g. feedwater pump for large boilers)
- Generator drive
- Compressor drive
- Combined heat & power (CHP or cogeneration) applications
- Waste to energy, e.g. waste incinerators
- Applications which use waste heat, e.g., in steel works or in the chemical/petrochemical industry where waste heat from chemical processes can be used
- Geothermal power plants (SST-500 GEO)

### Turbine layout



Example for a turbo generator layout of a SST-500 GEO



### SST-500 – design features

The SST-500 turbine is a condensing turbine, designed with two steam inlets. The steam flows into the turbine by means of two tangential inlets to equalize thermal and blade stress. Emergency stop valves and control valves are installed in the steam inlet pipes.

### Operational flexibility

The steam flows tangentially into the inner casing and then axially to both exhausts. The customized design of the steam path ensures optimized efficiency and reliability. Double-end drive is available, if required, e.g. for booster pump drive.

### Designed for reliability

The utilization of selected proven components assures high reliability and easy maintenance. The rotor is made from a single forging. The moving blades with integral shrouds are made from 13% chromium steel. The twisted last stage blades are precision-forged or milled, depending

on the blade size. The leading edge of the last two blade rows is flame or laser hardened. The material, manufacturing method and profile of the blades maximize operational reliability.

Labyrinth glands are used to prevent air leakage into the condenser. The sealing steam connected to the inner gland chambers can be controlled manually or automatically as required. The journal bearings are of double-wedge or tilting pad type. The axial position of the rotor is maintained by a double-sided tilting pad axial bearing.

### Turbine generator arrangement

The SST-500 turbines are designed for elevated installation on a turboset foundation or a separate skid to a condenser or exhaust piping. One common condenser or two separate condensers can be used. The turbine is supplied assembled on a base frame, or in components, depending on the size. The oil system is installed on a separate skid. In case of a base frame installation, all instrumentation is pre-wired to junction boxes or a local cubicle and installed on the base frame.

#### Design features

- Proven
- Modular
- Compact
- Proven, customized steam path for optimized efficiency with low steam parameters
- Throttle-controlled
- With or without uncontrolled extractions

#### Customer benefits

- High reliability / availability due to use of proven components
- High efficiency
- Suitable for variable speed mechanical drives
- High standard of quality
- Remote diagnostic system
- Fast and early layout planning



# SST-500 GEO for Geothermal Plants

The SST-500 GEO is a derivative of the SST-500 turbine family, optimized for the demanding conditions of geothermal steam cycles. It can be used in geothermal applications with superheated direct steam, single flash or dual flash, offering an outstanding reliability, flexibility and economy of operation.

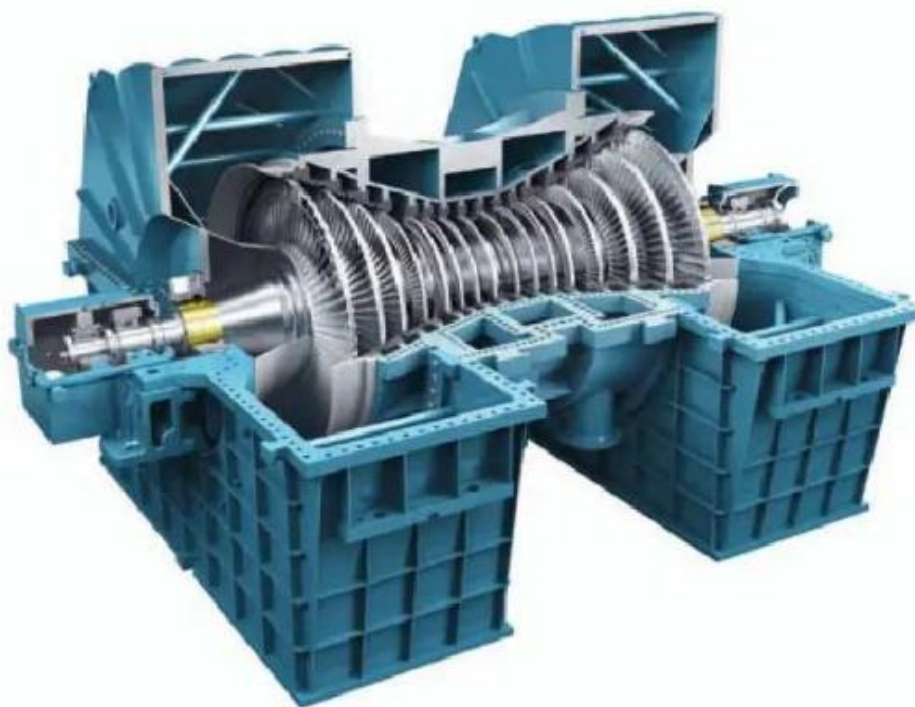
The SST-500 GEO combines the proven casing and turbine-generator package of the Siemens SST-500 and SST-600 steam turbine with a number of special geothermal features and steam path technologies developed, tested and applied in the geothermal after-market.

## Customized Geothermal Steam Path

Each turbine is designed uniquely for the particular resource conditions by adapting the blade path within the standardized casing. Like all Siemens geothermal turbines, the SST-500 GEO is designed with a robust impulse type steam path. At the same time, the inlet nozzles and stop and control valves are sized to suit the steam pressure and mass flow.

## Corrosion-resistant materials

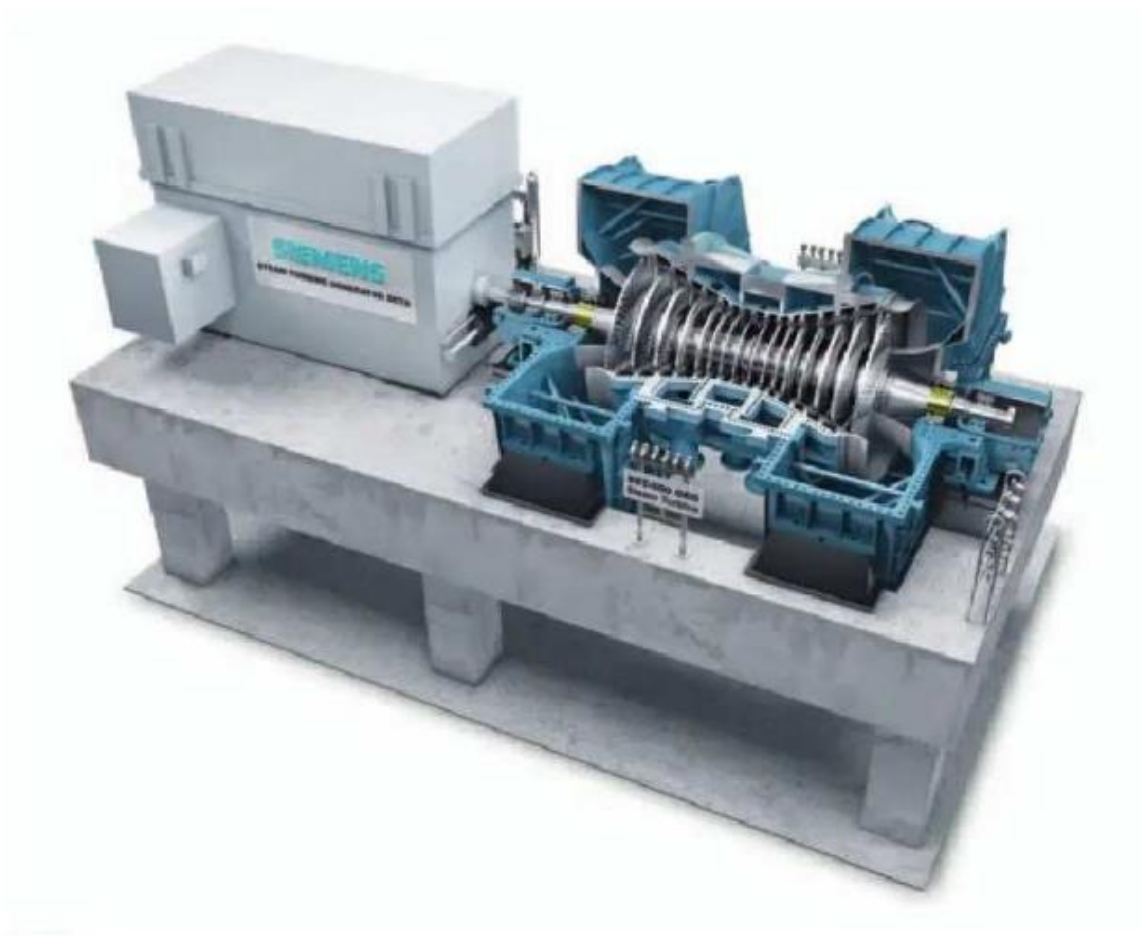
The materials of all steam path components are specifically selected according to the particular conditions and the specific steam chemistry of the application to resist corrosion and corrosion-related cracking.



### Special Adaptations:

- Materials selection optimization is resource and turbine stage specific.
- LP blades are continuously coupled; HP blades are integrally shrouded.
- Where required, rotor surfaces are coated or IN625 weld cladded.
- All rotor and blade fillets are of generous, low stress design.





#### SST-500 GEO Design Features:

- Robust impulse design and generous clearances result in sustained efficiency and high reliability
- Proven steam path for optimized reliability with low steam parameters
- Table top installation – down exhaust (up could be possible)
- Advanced highly effective moisture removal techniques
- Ease of maintenance due to inlets in casing lower half

#### Blades

- Integral shrouds (continuous coupled) to lower alternating stress and resist corrosion-assisted fatigue
- Brazed or laser applied Stellite alloy on last stage
- Modern airfoil shapes to improve turbine efficiency
- Widely spaced nozzles to resist fouling from deposits
- Modern dovetails that reduce peak stress and resist stress corrosion cracking

#### Materials

Special material selection to meet geothermal specific steam chemistry and to resist corrosion attacks and corrosion-assisted fatigue cracking:

- 12 Cr steam path in the diaphragms
- 2% Cr integral forged rotor; 12% Cr optional
- X-15 & 17-4 blades standard, Titanium and Inconel optional



#### SST-500 technical data

- Power output 50 or 60 Hz, up to 100 MW
- Speed range up to 15,000 rpm
- Live steam conditions  
Pressure up to 30 bara / 435 psia  
Temperature up to 400°C / 750°F
- Bleeds up to 2 at various pressure levels
- Exhaust steam conditions:  
Condensing  $\leq$  1 bar / 14.5 psi

#### SST-500 GEO technical data

- Power output 50 or 60 Hz, up to 120 MW
- Speed: direct drive (3000 / 3600 rpm)
- Live steam conditions  
Pressure up to 15 bara / 218 psia  
Temperature up to 250°C / 482°F
- Exhaust steam conditions  
Condensing up to 0.4 bara / 5.8 psia

## Anexo 6 – Ficha técnica de generador Siemens SGen6-100A-2P de 125 MVA

### Key features

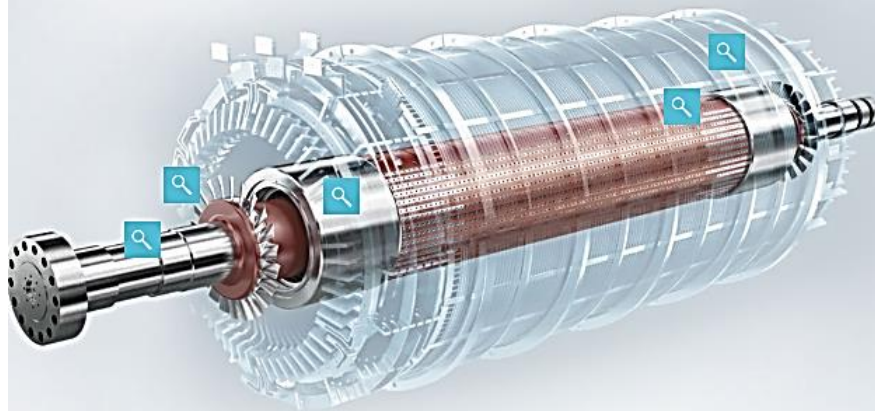
Apparent power

**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 7 – Ficha técnica de generador Siemens SGen6-100A-2P de 125 MVA

# Compabloc

The Compabloc welded plate heat exchanger from Alfa Laval is just reaching peak performance when many other conventional heat exchangers start to run out of steam. With no gaskets between the plates, Compabloc is perfect for operation in chemically aggressive environments and for handling high-temperature fluids.

### The heart of the matter

The heart of Compabloc is a stack of corrugated heat-transfer plates in stainless steel or exotic materials, welded alternately to form channels. Compabloc is available in seven different plate family models: CP15, CP20, CP30, CP40, CP50, CP75 and CP120 with heat transfer areas ranging from 0.7 to 840m<sup>2</sup> (7 to 8985 ft<sup>2</sup>) per unit. Each model is modularized with a standard number of plates to fit any duty.

### Welds that meet your challenges

Compabloc models CP15 and CP20 are TIG welded whereas the larger models CP30 to CP120 are laser welded. The advantage of laser welding is that the weld is thinner and more accurate, and the heat input is substantially reduced. This results in a unit with less stress, which makes it less sensitive to fatigue and cycling. In other words, laser welding improves reliability, extends the working life, and enables Compabloc installation in harsh environments. Another advantage is the shorter and more flexible delivery time.

In addition to the advantage of using high tech laser welding the plates are configured in such a way that the joint between the plates allows butt welding thus eliminating the crevices that are a feature of other welded plate exchangers using manual TIG welding, and that are highly susceptible to crevice corrosion.

### Plate pattern

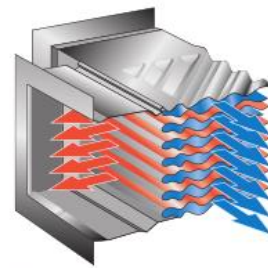
The laser-welded range of Compablocs is available with three plate patterns – the K series, designed with a special

focus on efficient mechanical cleaning, the L series to meet the particular requirements associated with high-pressure applications, and the X pattern combining high pressure and mechanical cleanability.

All patterns have been optimized with regards to structural strength and flow mechanics, making the Compabloc more resistant to pressure peaks and cycling. This boosts the reliability and safety of the unit as well as providing better heat transfer performance.

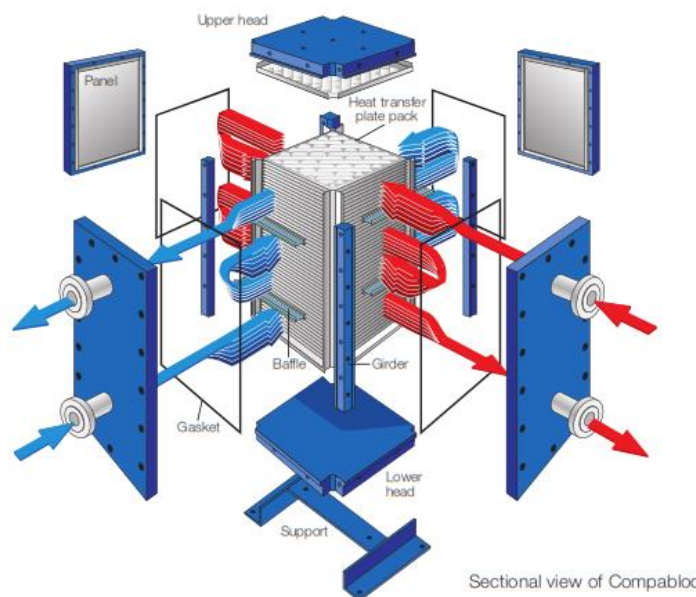
### Flow paths

The two media flow in alternately welded channels between the corrugated plates. They flow in a cross-flow

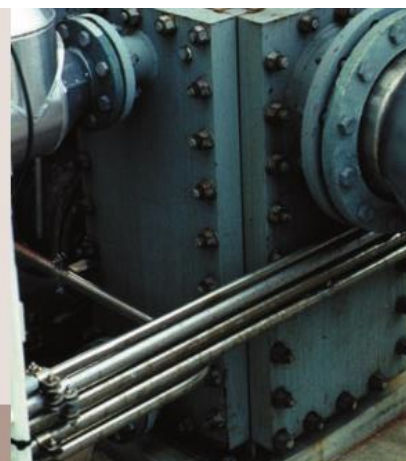


The two media flow in cross-flow in alternately welded channels

arrangement within each pass (see figure at right) while the overall flow arrangement is counter-current for a multi-pass unit (see sectional view below). When required, the unit can be designed with overall co-current operation. Each pass is separated from the



Compabloc plate heat exchanger installed for liquid-to-liquid heat recovery in a chemical plant in Scandinavia



adjacent passes by a pressed baffle, which forces the fluid to turn between the plate pack and the panel. This enables cleaning by backflushing. Baffles are inserted inside the plate pack as shown in the two figures on the next page. The baffles are dimensioned to withstand full vacuum and can be rearranged to fit a change in duty.

#### Body

The Compabloc frame consists of four corner girders, top and bottom heads and four side panels with nozzle connections. These components are bolted together and can be quickly taken apart for inspection, service or cleaning.

#### Panels and nozzles to fit

The panels and nozzles can be unlined or lined using the same materials as the plate pack. The nozzle size is variable and can be selected independently for each side. The nozzle size is determined by:

- the frame width (i.e. plate size).
- the frame height (i.e. number of plates).
- the number of plates per pass (i. e. pass height).

Compabloc's variable nozzle sizes and flexible pass arrangements make it suitable for liquid-to-liquid duties with dissimilar flow rates. In condensation duties the vapour inlet may need a large nozzle while the condensate requires only a small one.

Between the panel and the column lining is a gasket that seals off the exterior. This gasket can be made of graphite, or ptfе or other typical flange gasket materials.

#### Range

**CP** (TIG welded, medium pressure, cleanable mechanically): CP15 & CP20

**CPL** (laser welded, high pressure, cleanable chemically): CPL30, CPL50 & CPL75

**CPK** (laser welded, medium pressure, cleanable mechanically): CPK40, CPK50 & CPK75

**CPX** (laser welded, high pressure, cleanable mechanically): CPX120

**HCP** (laser welded, hygienic design and manufacture): HCP15, HCP20, HCP30 & HCP40

**CPM** (laser welded, 2 section condenser with 2 different cooling media): CPM15, CPM20 & CPM30

#### More in less space

Compabloc is very compact. All the heat transfer area is packed into a smaller footprint than that required for comparable heat exchangers. For example, a Compabloc with 330m<sup>2</sup> (3 530 ft<sup>2</sup>) heat transfer area needs only 1m<sup>2</sup> (11 ft<sup>2</sup>) of floor space.

#### Extended performance limits

Compabloc extends design pressure from full vacuum (FV) up to 42 barg (600 psig) depending on the model, and standard design temperatures up to 350° C and down to -29° C (ASME design) or alternatively -40° C (PED design), with the possibility of special design down to -100° C (-148° F).

#### Take your pick of plate materials

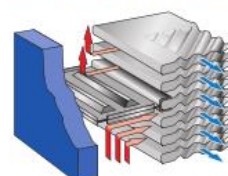
Compabloc is available in virtually any material that can be pressed and welded, including:

- AISI 304L
- alloy C22

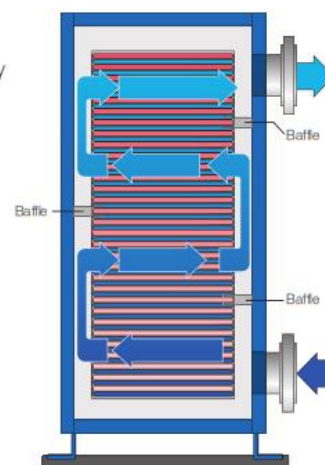
- AISI 316L
- alloy B-2
- titanium
- titanium-palladium
- incoloy™ 825
- hastelloy™ C2000
- alloy C276
- tantalum
- 254 SMO
- 904L (UB6)

#### Made to order

Compabloc is manufactured as standard in accordance with international pressure vessel codes such as ASME (with or without U stamp) or ADM (code used for PED and CE Marking).



Cross-section of a baffle arrangement illustrating flow distribution



A series of baffles force the media to reverse flow direction and create a multi-pass flow pattern



# Made to meet the process conditions

While many heat exchangers on the market today are manufactured to satisfy a broad range of process conditions, Alfa Laval's Compabloc heat exchangers are tailor-made to meet the customer's exact process conditions. This design flexibility includes both the flow configurations in the heat exchanger and the installation mode.

## Flow configurations for different duties

Compabloc can be designed with both single-pass or multi-pass flow configurations. For condensation and liquid-to-liquid duties without temperature cross, the single-pass configuration is suitable with its total cross-flow.

For duties with temperature cross and close temperature approaches, a multi-pass configuration is suitable. Each pass is in cross-flow, but the overall flow pattern within the heat exchanger is counter-current.

The configuration of Compabloc has unique advantages that permit:

- a different number of passes on the two circuits, thereby enabling large differences in flow rates between the hot side and the cold side.

- the rearrangement of the baffles to fit a new duty should the flow rates or temperature change.

## Three ways to install Compabloc

Compabloc plate heat exchangers can be installed in three different positions:

- **Vertical mounting** – normally used for liquid-to-liquid duties, condensation with subcooling and gas cooling duties, particularly when floor space is limited.
- **Horizontal mounting** – used for condensation duties, reboiling, gas cooling or liquid-to-liquid duties, when there are height limitations.
- **Suspended mounting** – hanging the unit from the ceiling generally used for condensing duties.

## Compabloc vs. shell-and-tube

Take a look at a few of the features, advantages and benefits of Compabloc in comparison with the shell-and-tube heat exchanger:

- **Alternately welded plates** – permit access for inspection, service, or cleaning.
- **No gaskets between plates** – allows operating:
  - with aggressive media.
  - at higher temperatures and pressures.
- **Corrugated plates** – promote high turbulence which, in turn:
  - achieves three to five times greater overall heat transfer coefficients than a shell-and-tube heat exchanger.
  - minimizes fouling, which makes longer operating periods possible.
- **Close temperature approach** – can handle temperature approaches down to 3°C (5.4°F).



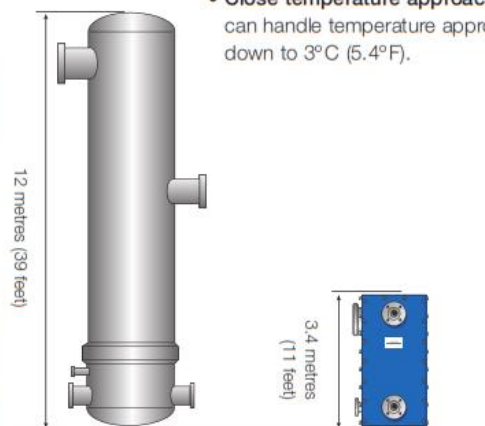
Compabloc installed as stripping column reboiler at an ethyl-acetate plant in Rhodia, Brazil



Vertical Compabloc for liquid/liquid heat recovery



Suspended mounting for condensation duties



Compabloc vs. shell-and-tube (same duty).

# Designed with demanding duties in mind

When it comes to high thermal performance under difficult process conditions, the laser welded Compabloc has a distinct advantage over alternative heat exchangers including shell-and-tube.

- **Compactness** – takes only a fraction of the floor space of a shell-and-tube heat exchanger.

### Condensation & evaporation

In condensing and evaporating duties, the Compabloc provides additional advantages:

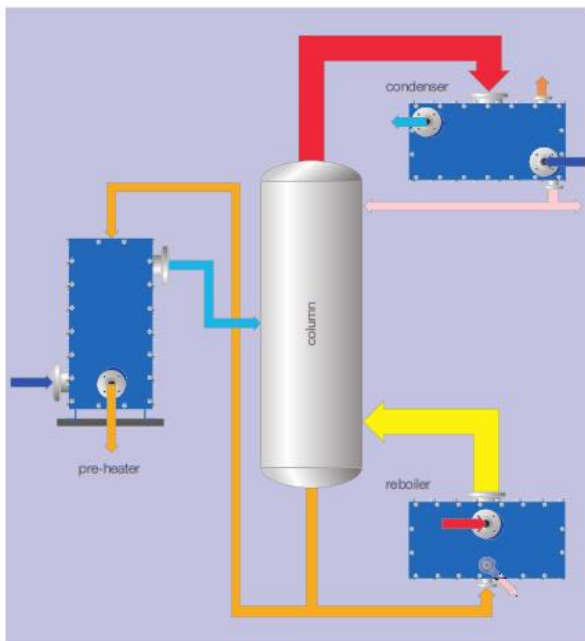
- **Large cross-flow area and short flow path** – fit low-pressure condensing duties and allow very low pressure drops.

- **Versatility** – variable nozzle sizes allow Compabloc to handle large differences between vapour and condensate flow rates.

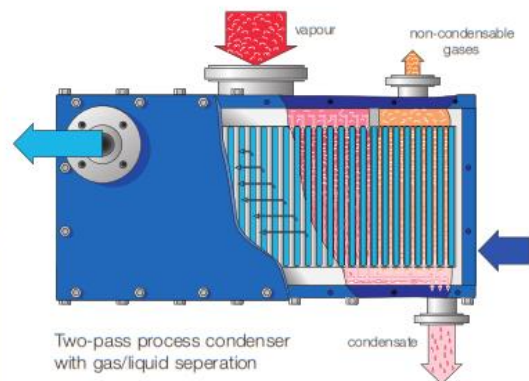
- **No need for extra equipment** – a two-pass arrangement on the condensing side permits gas-liquid separation in the unit, thereby eliminating the need for a separator. The main

condensation takes place in the first pass; final condensation or sub-cooling of inerts takes place in the second pass, which also serves as a mist eliminator.

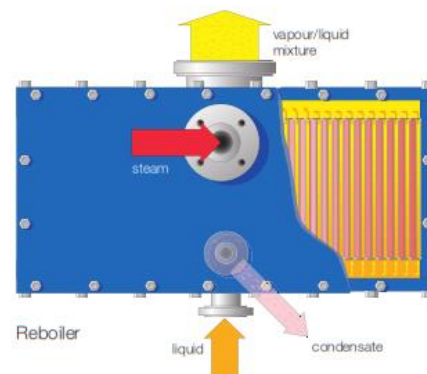
- **Short flow path and flexible connection sizes** – make Compabloc a perfect reboiler and evaporator.



Compabloc as pre-heater, condenser and reboiler



Two-pass process condenser with gas/liquid separation



Reboiler

# From oil & gas to district heating

The numerous advantages of the Compabloc heat exchanger make it suitable for use in a wide range of industries and applications.

## Applications

### Oil & gas production

- Heat recovery in TEG systems (gas dehydration)
- Heat recovery, cooling, condensation & reboiling in amine systems (gas sweetening, sour service)
- Heat recovery, heating and cooling in crude oil dehydration and desalination systems
- Condensation in vapour recovery units
- Heat recovery, cooling, condensation and reboiling in NGL fractionation systems

### Refineries

Various condensing & reboiling duties such as:

- Condensation in atmospheric and vacuum distillation
- Top condensing on fractionators in FCC, hydrocracking, H<sub>2</sub>S strippers, etc.
- Propane & butane overheads condensing in NGL and alkylation plants
- Reboiling in H<sub>2</sub>S strippers, sour water strippers and other columns
- Steam generation

Heat recovery, cooling & heating duties such as:

- Cooling of gasoline, kerosene, gas oil, diesel, pump-around etc
- Cooling & heating of bitumen, VGO (vacuum gas oil) and other heavy products
- Fractionator feed/bottom heat recovery
- Pre-heating of crude oil
- Desalted water/feed water heat recovery

### Hydrocarbon process industry

Condensation, heating/cooling, heat recovery and reboiling duties in the production of:

- primaries such as olefins, aromatics, aldehydes, acids, ethers, esters, ketones, and halogens
- intermediates such as acrolein, acrylic acid and acrylates, acrylonitrile, adipic acid, alkylbenzenes, aniline/nitrobenzene, benzenesulphonic acid, bisphenol A, caprolactam, diisocyanates (MDI & TDI), ethylbenzene/styrene, ethylene oxide/glycol, hexamethylenediamine (HMDA), maleic anhydride, melamine, phenol, phosgene, phthalic anhydride, propylene oxide/glycol, terephthalic acid (PTA)/dimethyl terephthalate (DMT), vinyl acetate, vinyl chloride, EDC
- polymers including polyethylene, polypropylene, polystyrene and styrene co-polymers, formaldehyde resins, polycarbonates, polyols, polyvinyl acetate, and polyvinyl alcohol
- other organic chemicals such as soaps and detergents, paintings and coatings

### Pharmaceutical industry & specialty chemicals

- Special 2-pass condenser with built-in gas/liquid separation chamber and mist eliminator for reactor overhead and vent condensation
- Primary and vent condensation with hygienic design
- Solvent recovery
- Special 2-pass condenser with 2 cooling medias.

### Coke oven plants

- Ammonia liquor scrubber cooling
- Debenzolyzed oil cooling
- Benzolyzed oil heating

### Chlorine alkali plants

- Chlorine gas cooling (drying)
- Hydrogen gas cooling (drying)

### Fertilizer production

- Nitrogen gas cooling
- CO<sub>2</sub> gas cooling (3-step compressor interstage cooler - gas drying)
- Ammonia heat recovery and stripping column reboiler
- Nitric acid cooling

### Hydrogene peroxide plants

- Heat recovery and cooling of process streams

### Ammonium nitrate

- Spent sulphuric acid heat recovery.
- Oleum cooling

### Mining industry

- Nickel refining solvent extraction

### Vegetable oil & fatty acids

- Feed/bottom in deodorization

### HVAC, district heating, energy, utilities, general services

- Hot water production system
- Steam heating
- Heat recovery



#### Compact facts about Compabloc

Design temperature:	up to 350°C (660°F), down to -100°C (-148°F).
Design pressure:	up to 42 barg (600 psig) depending on models and full vacuum (FV).
Maximum heat transfer area:	840 m <sup>2</sup> (8985 ft <sup>2</sup> ).
Maximum liquid flow rate per unit:	6000 m <sup>3</sup> /h (26250 USgpm).
Lowest achievable temperature difference:	3° C (5.4° F).
Duty:	heat recovery (feed/bottom on stripping/distillation column), cooling, heating, condensation, partial condensation, reboiling, evaporation and gas cooling.
Performance:	low to high thermal length or NTU duty. Handles any corrosive medium.

#### Compact facts about Compabloc

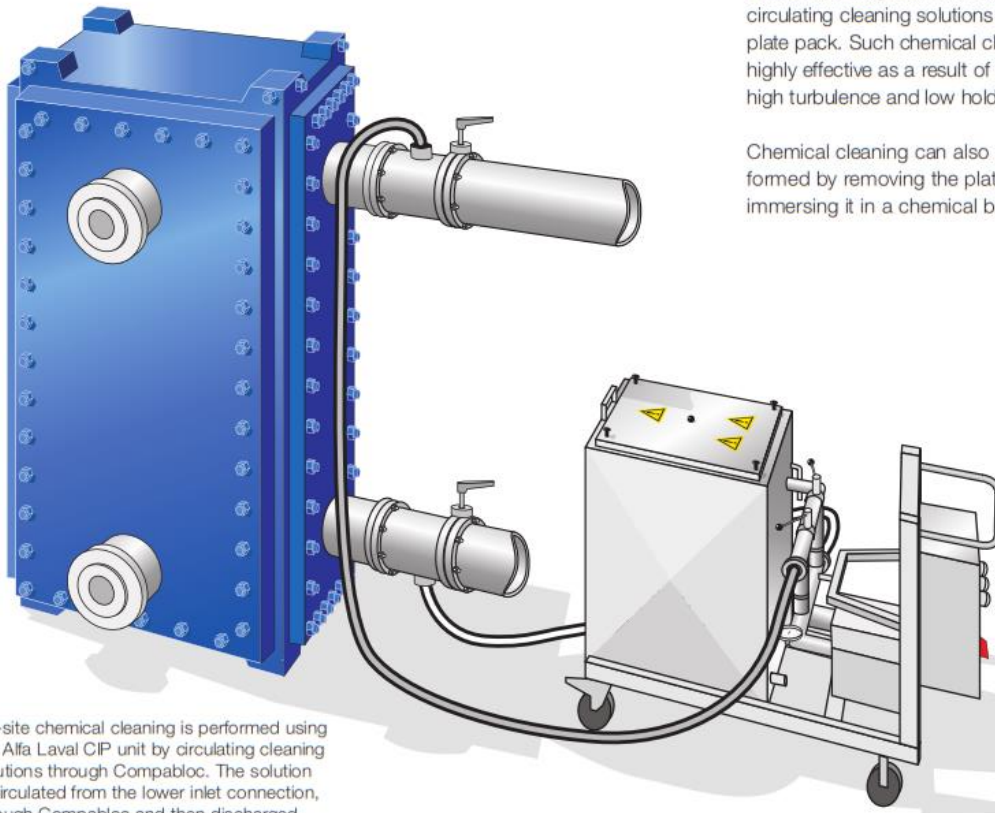
Design temperature:	up to 350°C (660° F), down to -100°C (-148° F).
Design pressure:	up to 42 barg (600 psig) depending on models and full vacuum (FV).
Maximum heat transfer area:	840m <sup>2</sup> (8985 ft <sup>2</sup> ).
Maximum liquid flow rate per unit:	6000m <sup>3</sup> /h (26250 USgpm).
Lowest achievable temperature difference:	3° C (5.4° F).
Duty:	heat recovery (feed/bottom on stripping/distillation column), cooling, heating, condensation, partial condensation, reboiling, evaporation and gas cooling.
Performance:	low to high thermal length or NTU duty. Handles any corrosive medium.

#### In case of service...

The flexible construction of the Compabloc makes service a straight-forward matter. Cleaning can be done using 2 different methods. Cleaning by hydroblasting is carried out on site by removing the panels and blasting the inside of the plate pack with a water jet at pressures of up to 1000 barg.

On-site cleaning can also be done by circulating cleaning solutions through the plate pack. Such chemical cleaning is highly effective as a result of the unit's high turbulence and low hold-up volume.

Chemical cleaning can also be performed by removing the plate pack and immersing it in a chemical bath.



On-site chemical cleaning is performed using the Alfa Laval CIP unit by circulating cleaning solutions through Compabloc. The solution is circulated from the lower inlet connection, through Compabloc and then discharged from the upper connection to the CIP tank.

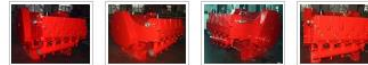
## Anexo 8 – Ficha técnica bomba grande Power Quintuplex émbolo de 2800 hp

### 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 es 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 las bombas 2800HP son de diferentes extremos de fluidos, que están equipadas con el mismo fin de poder. Esta colocación positiva de bomba de efecto simple horizontal es ampliamente utilizada en las operaciones petroleras intermitentes, como la acidificación, fractura, así como 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)	Presión (Mpa)	Desplazamiento (L/min)	Presión (Mpa)	Desplazamiento (L/min)	Presión (Mpa)	Desplazamiento (L/min)	Presión (Mpa)
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 9 – 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	Espesor Nominal	Peso	Espesor Nominal	Peso	Espesor Nominal	Peso	Espesor Nominal	Peso
Pulg.	mm	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	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	
		160	13.49	4499	4499	4251	3824	3779	2924	2429	1916	
5" (125)	XXS		17.12	5852	5852	5530	4975	4916	3804	3160	2545	
	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	
	160	15.88	4265	4265	4030	3626	3583	2772	2303	1856		
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	1966	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



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, SALAZAR MENDOZA ANIBAL JESUS, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - CHICLAYO, asesor de Tesis titulada: "Propuesta de mitigación de impacto ambiental mediante el diseño de una central geotérmica en el campo geotérmico Ancocollo, Tacna", cuyos autores son PRADA HUAMAN RAFAEL EDGAR, MONTENEGRO GUERRERO IRVIN IVAN, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 10.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

CHICLAYO, 03 de Julio del 2023

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
SALAZAR MENDOZA ANIBAL JESUS <b>DNI:</b> 16720249 <b>ORCID:</b> 0000-0003-4412-8789	Firmado electrónicamente por: AJSALAZARM el 03- 07-2023 10:36:38

Código documento Trilce: TRI - 0565939