



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

Generación de hidrógeno verde mediante energía térmica en
campo geotérmico Chivay Pinchollo

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Magallan Herrera, Jesus Nazareno (orcid.org/0009-0002-2740-2475)

Rubio Vasquez, Oscar (orcid.org/0000-0003-4503-0011)

ASESORA:

Mg. Serrepe Ranno, Miriam Marcela (orcid.org/0000-0001-9342-1717)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, Transmisión y Distribución

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2023

Dedicatoria

A mis padres, por el incansable esfuerzo que han hecho para mi desarrollo personal y académico y a mis hermanos por el cariño y apoyo que siempre me ha brindado.

A mi novia, por su gran amor, comprensión y apoyo, a mi hijo, porque es todo en mi vida.

Agradecimiento

Agradezco a Dios como ser supremo y creador nuestro y de todo lo que nos rodea y por habernos dado la inteligencia, paciencia y su enorme guía en nuestras vidas.

Un especial agradecimiento a mi asesora quien me apoyó constantemente en la elaboración de este trabajo, el que servirá para el beneficio del desarrollo de la sociedad desde los aportes de esta investigación en ingeniería eléctrica

Además, a nuestra institución UCV y nuestros docentes por su apoyo incondicional durante el desarrollo de nuestra formación profesional, en donde con sus enseñanzas, consejos y aliento nos supo encaminar al cumplimiento de nuestro objetivo final concluir nuestra carrera.



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Generación de Hidrógeno Verde Mediante Energía Térmica en el Campo Geotérmico Chivay Pinchollo", cuyos autores son MAGALLAN HERRERA JESUS NAZARENO, RUBIO VASQUEZ OSCAR, 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.

TRUJILLO, 12 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA DNI: 06437594 ORCID: 0000-0001-9342-1717	Firmado electrónicamente por: SRANNOMM el 14- 12-2023 09:44:21

Código documento Trilce: TRI - 0694145



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, MAGALLAN HERRERA JESUS NAZARENO, RUBIO VASQUEZ OSCAR estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Generación de Hidrógeno Verde Mediante Energía Térmica en el Campo Geotérmico Chivay Pinchollo", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

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

Nombres y Apellidos	Firma
JESUS NAZARENO MAGALLAN HERRERA DNI: 72197937 ORCID: 0009-0002-2740-2475	Firmado electrónicamente por: JMAGALLANH el 12- 12-2023 17:03:30
OSCAR RUBIO VASQUEZ DNI: 46370018 ORCID: 0000-0003-4503-0011	Firmado electrónicamente por: ORUBIOVAS el 12-12- 2023 17:03:37

Código documento Trilce: TRI - 0694149

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Declaratoria de autenticidad de la asesora	iv
Declaratoria de originalidad de los autores	v
Índice de contenidos	vi
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	17
3.1. Tipo y diseño de investigación	17
3.2. Variables y operacionalización	17
3.3. Población, muestra, muestreo	18
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	18
3.5. Procedimientos	19
3.6. Método de análisis de datos	22
3.7. Aspectos éticos	22
IV. RESULTADOS	23
4.1. Características de los ciclos termodinámicos	23
4.2. Análisis comparativo entre los ciclos termodinámicos	31
4.3. Generación de hidrógeno	52
4.4. Selección de equipamiento	52
4.5. Indicadores de rentabilidad	55
V. DISCUSIÓN	65
VI. CONCLUSIONES	69
VII. RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS	71
ANEXOS	79

Índice de tablas

Tabla 1. Potencial y capacidad posible de desarrollo en campos geotérmicos....	31
Tabla 2. Interpolación para calcular $T1$	32
Tabla 3. Interpolación para calcular $s1$	32
Tabla 4. Interpolación para calcular $h1$	32
Tabla 5. Datos para calcular $v1$	32
Tabla 6. Interpolación para calcular $T2$	33
Tabla 7. Interpolación para calcular $T2r$	35
Tabla 8. Resumen del Ciclo Orgánico Rankine – Cálculo manual	37
Tabla 9. Resumen comparativo de resultados.	37
Tabla 10. Resumen de eficiencias térmicas reales.	50
Tabla 11. Presupuesto de central geotérmica para generar hidrógeno verde.....	55
Tabla 12. Horizonte de evaluación para inversiones.....	56
Tabla 13. Ahorro en energía generada y potencia.	56
Tabla 14. Venta de hidrógeno período 2024 – 2043.	57
Tabla 15. Venta de oxígeno período 2024 – 2043.	58
Tabla 16. Perspectiva de inflación para el 2022 al 2023.	58
Tabla 17. Análisis de indicadores de rentabilidad.	60
Tabla 18. Indicadores para análisis de rentabilidad.	60
Tabla 19. Indicadores de rentabilidad.	61
Tabla 20. Tasas de descuento para diferentes países.....	63
Tabla 21. Resumen de información para calcular LCOE	64

Índice de figuras

Figura 1. Energías renovables y no renovables a nivel mundial.	10
Figura 2. Ejemplo de un campo geotérmico.	11
Figura 3. Símbolo del hidrógeno.	12
Figura 4. Formas viables de generación de hidrógeno verde y su aplicación	13
Figura 5. Rutas convencionales para generar hidrógeno verde	13
Figura 6. Proceso de electrólisis del peróxido de hidrógeno	14
Figura 7. Esquema ideal y diagrama termodinámico del ciclo Rankine	15
Figura 8. a) Diagrama del ciclo real. b) Irreversibilidades en la turbina y bomba .	15
Figura 9. Ejemplo de Ciclo binario de potencia	16
Figura 10. Esquema de los procedimientos a seguir para desarrollar los objetivos planteados.....	21
Figura 11. Esquema termodinámico del Ciclo Binario Rankine.....	25
Figura 12. Esquema del Ciclo Binario modificado con evaporación flash.	28
Figura 13. Esquema termodinámico del Ciclo Binario Doble Flash.....	30
Figura 14. Esquema del intercambiador de calor	36
Figura 15. Ciclo binario modificado con separación flash y flujos de masa.....	44
Figura 16. Esquema del ciclo binario doble flash y flujos de masa.	51

Resumen

El estudio tuvo como objetivo evaluar la generación de hidrógeno verde y oxígeno mediante energía térmica en el campo geotérmico Chivay Pinchollo. Los ciclos para el análisis fueron el Ciclo Orgánico Rankine, Ciclo Binario Modificado con separación Flash y Ciclo Binario Doble Flash. El campo geotérmico Chivay-Pinchollo posee una altitud de 3 551 msnm, equivalente a una presión atmosférica de 65.311 kPa y una potencia de 150 MWe. Del análisis comparativo, el ciclo Orgánico Rankine obtuvo la mayor eficiencia de 27.38%, siendo seleccionado para continuar con el análisis. La central geotermoeléctrica puede generar 1 231 200 MWh al año, con una producción de 20 520 toneladas de hidrógeno verde y de 164 160 toneladas de oxígeno. El equipamiento para la central geotermoeléctrica fue una turbina de 150 MW, tres bombas de 1 748 kW c/u, un intercambiador de calor, seis electrolizadores de 25 MW c/u, un condensador, un generador de 200 MVA y tuberías de 14 pulgadas de diámetro. Del análisis de rentabilidad se obtuvo un ingreso total neto de S/. 2 601 665 936.06, con un VAN de S/. 816 915 936.06, una TIR de 16.12% y un tiempo de retorno de la inversión de 8 años.

Palabras clave: Energía geotérmica, rentabilidad, electrolizador, hidrógeno verde.

Abstract

The objective of the study was to evaluate the generation of green hydrogen and oxygen by thermal energy in the Chivay Pinchollo geothermal field. The cycles for the analysis were the Organic Rankine Cycle, Modified Binary Cycle with Flash separation and Double Flash Binary Cycle. The Chivay-Pinchollo geothermal field has an altitude of 3,551 masl, equivalent to an atmospheric pressure of 65,311 kPa and a power of 150 MWe. From the comparative analysis, the Organic Rankine cycle obtained the highest efficiency of 27.38%, being selected to continue with the analysis. The geothermal power plant can generate 1 231 200 MWh per year, with a production of 20 520 tons of green hydrogen and 164 160 tons of oxygen. The equipment for the geothermal power plant was a 150 MW turbine, three pumps of 1 748 kW each, a heat exchanger, six electrolyzers of 25 MW each, a condenser, a 200 MVA generator, and 14-inch diameter pipes. From the profitability analysis, a total net income of S/. 2,601,665,936.06 was obtained, with an NPV of S/. 816,915,936.06, an IRR of 16.12% and a payback time of 8 years.

Keywords: Geothermal energy, profitability, electrolyzer, green hydrogen.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se puede verificar un aumento en el consumo de energía de tipo renovable, debido al agotamiento de las fuentes primarias no renovables o combustibles tipo fósil, además de la contaminación que generan como consecuencia de su ignición (Hossein *et al.*, 2019; Turhal *et al.*, 2019; Mishra *et al.*, 2019; Mehta *et al.*, 2019). Esto se debe al crecimiento poblacional y al desarrollo de la economía en el suministro energético adicional a la restricción sobre las emisiones de gases contaminantes (Sharma *et al.*, 2020; Alirahmi *et al.*, 2021).

Por ello, el uso de energías renovables para generar hidrógeno se considera una alternativa factible para solucionar dicho problema (Sheikhbahaei *et al.*, 2018; Sharma y Melkania, 2018). Además, se han llevado a cabo avances alentadores y sustanciales en los equipos que usan energía geotérmica para generar electricidad, en el ámbito técnico y sostenible, usando configuraciones independientes o híbridas (Olabi *et al.*, 2021; Michopoulos, 2020; Uchida *et al.*, 2019).

El hidrógeno es considerado una excelente opción favorable como futuro combustible. Sin embargo, ciertos obstáculos inhiben la utilización generalizada del combustible de hidrógeno, como el costo de producción y los requisitos especiales de manejo para el almacenamiento y el transporte (Al Enazi *et al.*, 2021).

En la actualidad, los altos costos de la tecnología siguen siendo una barrera para la adopción generalizada del hidrógeno, pero se prevé que a medida que aumente la escala de producción, es probable que los costos disminuyan (Tashie y Godfrey, 2021). Además de las numerosas materias primas, las tecnologías actuales de producción de hidrógeno están asociadas con procesos complicados y un alto consumo de energía (Zhang *et al.*, 2021).

A nivel mundial, comienza a existir un aumento en el consumo de energía no renovable que conduce a un retraso en la disminución de los gases contaminantes (Tetteh *et al.*, 2021). Además, su ritmo de consumo es muy acelerado, en un año, el mundo consume lo que la naturaleza genera en un millón de años, entonces el agotamiento de las reservas existentes es una realidad que no se puede tomar a la ligera. En realidad, ya es oficial el agotamiento del petróleo y del gas natural en un plazo de entre 2 generaciones. Las reservas de carbón son cada vez limitadas, siendo una energía primaria contaminante, de manera que su empleo se condiciona

al desarrollo de tecnologías renovables ecoamigables (Michea *et al.*, 2019).

Dichos sistemas geotérmicos son ampliamente más ecoamigables que los sistemas energéticos tradicionales, y ninguna tecnología está exenta de efectos dañinos en el medio ambiente y lo acreditan las investigaciones desarrolladas por Manzella *et al.* (2019) y Bosnjakovic *et al.* (2019). Debido a su forma de cómo se genera, sin quemar combustibles fósiles, siendo la energía geotérmica el calor o energía térmica que se almacena en el interior de la tierra y es una fuente inagotable de energía renovable. Existen alrededor de 1.1 millones de instalaciones a nivel mundial, como lo demuestra Akhtari *et al.* (2019) en su investigación.

Muchos países emplean la energía geotérmica y sigue en crecimiento, lo que demuestra una tendencia altamente positiva al largo plazo. Estados Unidos posee un potencial de 30 GW y emplea el 11.97%, es decir, de 3.591 GW; Filipinas posee un potencial de 4 GW, pero solo utiliza un 47.90%, es decir, 1.916 GW y México con un potencial de 4.6 GW con un porcentaje de utilización de 25.20%, que es 951 MW (Wahyudi *et al.*, 2019; Matuszewska *et al.*, 2019; Colucci *et al.*, 2021). En Sudamérica, Colombia posee una potencia geotérmica promedio aprovechable de 1 170 MWe (Alfaro *et al.*, 2021). En Ischia, Ceglia *et al.* (2021) propusieron un sistema que permitió reducir en 29 900 kg anuales de dióxido de carbono y un ahorro energético de 119 900 kWh anuales de energía primaria (Tranamil *et al.*, 2022).

Ball (2021); Paulillo *et al.* (2019) y Moya *et al.* (2018) manifestaron que para lograr la transición energética se debe hacer uso de fuentes de energía renovables dejando a un lado las fuentes primarias no renovables, para lograr un ambiente más ecológico. Aunque, como toda fuente renovable, la energía geotérmica también enfrenta desafíos, pero debido a su potencial energético, se está considerando su uso para generar electricidad, y así reducir los efectos de la contaminación.

Analizar la importancia del uso de la energía geotérmica para generar hidrógeno verde, con el fin de contribuir a reducir la contaminación originada por los gases de efecto invernadero y a mejorar la eficiencia térmica por medio del análisis de diferentes ciclos termodinámicos, de manera que se contribuye a generar nuevo conocimiento respecto a dicha problemática.

Por lo tanto, se plantea la pregunta general: ¿De qué manera se puede

generar hidrógeno verde y oxígeno al usar energía geotérmica en el campo geotérmico Chivay Pinchollo al emplear un electrolizador? Y como preguntas específicas: ¿Qué características posee el ciclo termodinámico empleado para producir energía eléctrica en el campo geotérmico Chivay Pinchollo, como temperatura, presión, entalpía y potencia?, ¿Qué ciclo termodinámico es mejor utilizar en el campo geotérmico Chivay Pinchollo?, ¿Qué cantidad de hidrógeno y oxígeno se genera anualmente dependiendo de la potencia del ciclo termodinámico utilizado al emplear un electrolizador?, ¿Qué equipos son necesarios que permitan optimizar la producción de energía eléctrica en el ciclo de potencia empleado? Y ¿Cuáles son los indicadores de rentabilidad de utilizar la energía geotérmica para generar hidrógeno verde y oxígeno en el campo Chivay Pinchollo mediante un electrolizador?

El objetivo general es: evaluar la generación de hidrógeno verde y oxígeno mediante energía térmica en el campo geotérmico Chivay Pinchollo. Planteándose como objetivos específicos: Determinar las características que debe poseer el ciclo termodinámico empleado para producir electricidad en el campo geotérmico Chivay Pinchollo, realizar un análisis comparativo entre el ciclo Orgánico Rankine, Ciclo Kalina y Ciclo Binario Flash, calcular la generación de hidrógeno anual dependiendo de la potencia generada en el ciclo termodinámico seleccionado, seleccionar el equipamiento necesario para optimizar la producción de potencia eléctrica y estimar los indicadores de rentabilidad de utilizar energía geotérmica para la generación de hidrógeno verde en el campo geotérmico Chivay Pinchollo. La hipótesis que se plantea en el presente proyecto es: Es posible producir hidrógeno verde y oxígeno de forma rentable generando energía térmica en el campo geotérmico Chivay Pinchollo mediante un electrolizador.

II. MARCO TEÓRICO

En el ámbito internacional, Ali Haider *et al.* (2023) efectuaron un estudio sobre el análisis de energético y exergético de un sistema multigenerador que emplea energía geotérmica para la sostenibilidad de una ciudad. Propusieron como objetivo proponer un sistema multigenerador que utilice energía geotérmica. En nuestra tesis se propone realizar el análisis de tres modelos de propuestas y la que posea mayor producción de energía eléctrica sería la más conveniente. Su muestra fue un sistema de multigenerador que empleó energía geotérmica. Los instrumentos que se utilizaron fue el análisis de información, análisis documental y registro de datos. Del análisis, se hizo uso de un ciclo de vapor regenerativo, de absorción de doble efecto y de desalación double flash. De los resultados, se logró demostrar que se puede producir una potencia considerable de energía eléctrica, agua potable e hidrógeno verde, los cuales pueden ser empleados en el sector doméstico e industrial. Se logró generar una potencia de 103 MW. Se calculó una eficiencia térmica de 24.42%, exergética de 38.96% y energética de 54.22%.

En África, específicamente en Yibuti, Awaleh *et al.* (2022) realizaron un estudio comparativo sobre la viabilidad económica en la producción de hidrógeno verde empleando electrólisis del agua con energía geotérmica y eólica en Asal-Ghoubbet Rift. Plantearon el objetivo de examinar la viabilidad económica de generar hidrógeno verde al emplear electrólisis del agua con energía renovable. La muestra de estudio fue la energía geotérmica y eólica de Yibuti. Emplearon como instrumentos al análisis de información y registro de datos. Del análisis, se tuvo un costo unitario de electricidad producida por el aerogenerador de \$ 0.042 por kWh, costo más bajo en relación a la producida por energía geotérmica, que tuvo un coste por unidad de energía producida de \$ 0.086 por kWh. En relación a la generación de hidrógeno, el coste al emplear energía eólica se encuentra entre \$ 0.672 y \$ 1.063/kg, mientras que, al utilizar energía geotérmica, el coste estaba entre \$ 3.31 y \$ 4.78/kg.

En China, Mukhtar *et al.* (2022) realizaron una investigación referente a la generación mundial de hidrógeno y energía sustentable, un análisis sobre la aplicación de la integralidad de los ciclos orgánicos Rankine para sistemas de

producción múltiple. Plantearon como objetivo revisar la aplicación de ciclos orgánicos Rankine en los sistemas para multigeneración. La muestra empleada fue de 19 artículos destacados en relación a la integralidad de los ciclos orgánicos Rankine usados en sistemas de multigeneración. El instrumento de recolección de datos empleado fue el registro de datos. De los resultados se determinó que el sistema logra mayores eficiencias exergéticas y energéticas al generar energía eléctrica y térmica, siendo de 37.88% y 47.9%, respectivamente, para una configuración multigeneración de ciclo orgánico Rankine y Concentrado fotovoltaico/térmico. Se obtuvo un aumento del 16% en la producción de electricidad en dicha configuración. Además, el agua caliente, el efecto de refrigeración y el hidrógeno generado por el sistema multigeneración son 0,4363 L/s, 161 kW y 1,515 L/s, respectivamente.

En Sudáfrica, Barasa y Akanni (2022) realizaron una revisión sobre las centrales eléctricas que emplean energía geotérmica en cabeza de pozo para la producción de energía eléctrica en red. Propusieron como objetivo general determinar el potencial, características y aplicación de las plantas eléctricas cabeza de pozo para la producción de energía eléctrica con el fin de complementar y sustituir las plantas eléctricas convencionales. La muestra de estudio fue las centrales eléctricas que usan tecnología geotérmica en cabeza de pozo. Se utilizaron como instrumentos el análisis documental y registro de datos. Del análisis se obtuvo que las plantas de energía de boca de pozo son ideales para países con regulaciones ambientales estrictas que hacen que el desarrollo de plantas de energía central sea restrictivo. En Japón, donde casi todos los recursos geotérmicos se encuentran en parques nacionales restringidos, mientras que las regulaciones ambientales son más flexibles para las plantas de energía de capacidad inferior a 7.5 MW. Por lo tanto, son las centrales eléctricas de boca de pozo las que brindan la opción de generación para estas áreas. Técnicamente, las centrales eléctricas disfrutan de economías de escala en comparación con las centrales eléctricas de boca de pozo y, por lo tanto, son superiores a las centrales eléctricas de boca de pozo en muchos indicadores de rendimiento de las centrales eléctricas que incluyen factor de capacidad, disponibilidad, factor de carga, costo unitario de generación de energía, entre otros. Por otro lado, las plantas de energía de boca de pozo poseen características únicas y deseables como entrega rápida

del proyecto y plazos de entrega cortos, uso óptimo de condiciones termodinámicas geotérmicas específicas de cabeza de pozo como temperatura, presión y características de salmuera para la máxima generación de energía mediante la optimización de la presión y la temperatura del flash.

En Islandia, Kjeld *et al.* (2022) desarrollaron una investigación referente al análisis del ciclo de vida de una central geotérmica Theistareykir, en Islandia. Propusieron como objetivo evaluar el ciclo de vida para la planta geotérmica Theistareykir. La muestra de estudio empleada fue la planta de energía geotérmica Theistareykir. Los instrumentos utilizados fueron el análisis documental y el registro de datos con un análisis termodinámico. Del análisis se puede decir que, muchos factores clave son similares entre los estudios de ciclo de vida publicados anteriormente, los límites del sistema no se han armonizado y muchos estudios tienen lagunas en su inventario para diferentes etapas del ciclo de vida. Se establece un conjunto estricto de requisitos para las declaraciones ambientales de productos, declaraciones verificadas por terceros de impactos ambientales basadas en ciclos de vida. Estos deben cumplir con las Reglas de Categoría de Producto, un conjunto de requisitos establecidos por todas las principales partes interesadas en el sector energético. Esto permite al menos una comparación justa entre diferentes estaciones de la misma o diferente fuente de energía, con un mayor nivel de confianza. Actualmente también se está trabajando dentro de la Unión Europea para armonizar las pautas de los ciclos de vida para sistemas geotérmicos.

En Irán, específicamente en Bandar Abbas, Assareh *et al.* (2022) realizaron un estudio donde plantearon como objetivo realizar un análisis comparativo de sistemas de generación múltiple impulsados por energía solar y geotérmica para la producción de limpia de electricidad e hidrógeno a través de evaluaciones de energía y exergía. Utilizaron un enfoque de investigación cuantitativo y diseño de investigación aplicada. La muestra empleada fue sistemas de generación múltiple impulsados por energía solar y geotérmica. Entre los instrumentos utilizados se tuvo al registro de datos y análisis documental. Emplearon el análisis termodinámico para poder dar contestación a los objetivos propuestos. De los resultados se determinó que el sistema geotérmico fue más eficiente que el sistema solar, en un 11.21 % más de generación de hidrógeno y en 0.17 % más de eficiencia exergética.

Según el análisis de sensibilidad, la eficiencia de la turbina, la temperatura de entrada del evaporador, el criterio de idoneidad del generador termoeléctrico, la eficiencia de la bomba y el caudal másico de entrada del evaporador fueron los parámetros más influyentes. Además, el análisis de exergía mostró que la mayor destrucción de exergía del sistema es pertinente al evaporador y la menor a la bomba. El sistema produce 352.816 kWh y 174.913 kg de hidrógeno al año.

En Indonesia, Qurrahman *et al.* (2021) realizaron una investigación referente al análisis de energía y exergía de la central geotérmica de Dieng. El objetivo propuesto fue realizar un análisis de energía y exergía para la central geotérmica Dieng. La muestra de estudio empleada fue la central geotérmica de Dieng. Entre los instrumentos utilizados se tuvieron al análisis de información y registro de datos. De los resultados se obtuvo que la mayor pérdida de exergía fue de 50 MW, ocurrida en la turbina, indicando que era el componente con mayor necesidad de reparación. En resumen, los resultados del estudio aclararon que el componente que necesitaba ser tratado y reparado en la planta de energía geotérmica de Dieng era la turbina. Los análisis de energía y exergía comienzan calculando la entalpía y la entropía de tanto la entrada como la salida de los datos de temperatura compilados, con la ayuda de una tabla de vapor. Los resultados del estudio muestran que la eficiencia más baja fue del 67 % en la turbina, y la tasa de cambio de energía más alta observada fue de 58 MW, en el intercondensador.

En Irán, Ghazvini *et al.* (2019) en su investigación sobre un análisis de revisión del empleo de la energía geotérmica para la generación de hidrógeno, desarrollada en Irán. Propusieron como objetivo proporcionar un resumen conciso de las actuales tecnologías y avanzadas en generación de hidrógeno. La muestra de estudio fue la energía geotérmica. Entre los instrumentos empleados se tuvo al análisis de información y registro de datos. Del análisis se pudo observar que el impacto ambiental fue menor al emplear el método de producción mediante electrólisis en función del viento. Entre tanto los métodos electroquímicos de generación de hidrógeno, métodos geotérmicos y tecnología solar poseen impacto ambiental mayor. Aunque, es destacable mencionar que la generación de hidrógeno en función de las fuentes renovables energéticas es mucho más amigable con el medio ambiente que aquellas que emplean combustibles fósiles.

De acuerdo con los resultados, el costo de producción de hidrógeno asistido por geotermia basado en electrólisis es competitivamente más bajo que otras fuentes como la eólica, la solar térmica junto con el gas natural, la solar fotovoltaica y la red. Además, se puede observar el mismo comportamiento para el costo de producción de hidrógeno asistido por geotermia basado en procesos termoquímicos. se abordan las descripciones del proceso de producción de hidrógeno asistida por geotermia junto con sus aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Entre las definiciones de las variables se tuvo lo siguiente:

Se define a la energía geotérmica como la energía que se encuentra en el interior de la tierra (Awaleh *et al.*, 2022).

Se define a la energía geotérmica como aquella que se puede extraer de la corteza terrestre mediante la perforación de pozos para la extracción de agua caliente y vapor, es decir, una mezcla bifásica (Barasa y Akanni, 2022).

En comparación con otras fuentes de energía renovable, la geotermia tiene el potencial de generar una producción de electricidad más estable y consistente, además de una generación de bajo desperdicio (Li *et al.*, 2023).

Se define a la producción de hidrógeno verde como la generación de hidrógeno al emplear un electrolizador y separar las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno (Awaleh *et al.*, 2022).

Se define a la producción de hidrógeno y energía como la producción de hidrógeno al utilizar la electrólisis por medio de un electrolizador y separar las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno (Mukhtar *et al.*, 2022).

El hidrógeno ha sido identificado como un combustible limpio "verde" de interés. En comparación con el uso de combustibles fósiles, la quema de hidrógeno da como resultado cero emisiones y puede obtenerse de fuentes de energía renovables. Además de cero emisiones de dióxido de carbono, el hidrógeno tiene varias otras propiedades atractivas, como un mayor contenido de energía gravimétrica y límites de inflamabilidad más amplios que la mayoría de los combustibles fósiles (Tashie y Godfrey, 2021).

Con respecto a las teorías relacionadas, se tiene lo siguiente:

La integración de la producción de hidrógeno es una parte integral de la mayoría de los sistemas de generación múltiple basados en ciclo Orgánico Rankine, ya que la producción de hidrógeno ayuda a maximizar la entrada de energía renovable en aplicaciones prácticas (Mukhtar *et al.*, 2022).

La energía geotérmica, junto con otras energías renovables (solar, eólica, undimotriz, termosolar) y bajas en carbono, desempeñarán un papel clave en la descarbonización de la industria de generación de energía para cumplir con el objetivo del acuerdo de París, realizado por las Naciones Unidas en 2015, sobre el cambio climático (Paulillo *et al.*, 2019).

Los resultados generales muestran que el área de Asal-Ghoubbet Rift (África) puede producir energía e hidrógeno verde a un costo menor utilizando energía eólica en comparación con la energía geotérmica (Awaleh *et al.*, 2022).

Entre las definiciones operacionales de cada variable se tuvo que:

De acuerdo con Wahyudi *et al.* (2019), la energía geotérmica se mide a partir de la presión y temperatura de extracción, con esos datos se puede determinar su entalpía y demás parámetros de operación, costos de explotación y costos de operación y mantenimiento.

En relación a lo mencionado por Assareh *et al.* (2022), la producción de hidrógeno se mide a partir de la energía eléctrica generada en el ciclo termodinámico Rankine de potencia, que por medio de un electrolizador se puede descomponer en oxígeno e hidrógeno, entre sus dimensiones se tiene a su poder energético y costos de funcionamiento.

Entre los indicadores de cada dimensión se tuvo:

Con respecto a la variable energía geotérmica, la dimensión parámetros de funcionamiento tiene como indicadores a la temperatura, flujo de masa y entalpía; la dimensión costos de explotación tiene como indicadores al costo de extracción y costo de reinyección y la dimensión costos de operación y mantenimiento tiene como indicadores costo de operación y costo de mantenimiento (Trujillo y Pérez, 2022).

En relación a la variable producción de hidrógeno, la dimensión poder energético tiene como indicadores aporte de energía, capacidad calorífica y

capacidad térmica; y la dimensión costos de funcionamiento tiene como indicadores costos de producción, costos de operación y costos de mantenimiento (Trujillo y Pérez, 2022).

La energía se define de acuerdo con Cengel *et al.* (2019), como aquella energía que puede ser percibida o no, no obstante, es sumamente importante para el desarrollo de la humanidad. Ya es conocido que la energía no es creada ni destruida, sino que es transformada, es decir, pasa de una energía específica a otra que sea requerida para un proceso específico. En un volumen de control o sistema abierto se puede transmitir hacia o desde dicho sistema mediante una entrada y salida de flujo de masa, en tanto, que, para sistemas de masa constante, es decir, cerrados, se puede transferir de dos formas, pudiendo ser calor o trabajo. Existen dos tipos de energía y son:

Energía primaria, se encuentra en la naturaleza y puede ser aprovechada mediante un proceso específico para generar energía eléctrica (Gobierno de Navarra, 2020).

Energía secundaria, se dice de aquella energía que se ha producido después de procesar la energía primaria, al utilizar un proceso de transformación y se llama energía útil o final (Gobierno de Navarra, 2020).

En la Figura 1 se muestra un gráfico sobre todas las energías renovables y no renovables empleadas a nivel mundial, donde cada color indica un tipo de energía.



Figura 1. Energías renovables y no renovables a nivel mundial.

Fuente: (Michea *et al.*, 2019).

La energía geotérmica es definida como aquella que se puede aprovechar del calor que se encuentra disponible en el interior del planeta Tierra. Proviene del término griego “geo” que significa “Tierra” y del término “thermos” que significa “calor”, esto es “calor de la Tierra”. Se sabe que adentro de la Tierra la temperatura es mayor que la temperatura ambiente y esta aumenta a medida que la profundidad también aumenta (Saunders, 2018). La energía geotérmica es una fuente muy atractiva de energía renovable ecoamigable. La explotación de este recurso natural es sencilla y casi no causa efectos nocivos para el medio ambiente. Pero si bien la geotermia no sufre la intermitencia de otras fuentes renovables, su eficiencia de extracción es bastante modesta en comparación con otras fuentes. Como resultado recientemente ha habido un gran interés en los sistemas híbridos que integran geotérmica y otras formas de energía para aumentar la eficiencia de producción (Ghani et al., 2020).

La Figura 2 muestra un ejemplo de un campo geotérmico, como se ve en la realidad, donde se expulsa vapor debido a la alta temperatura que poseen.



Figura 2. Ejemplo de un campo geotérmico.

Fuente: (Saunders, 2018).

El Hidrógeno, llamado vector energético, porque no se encuentra disponible de forma directa en la naturaleza, y para generarlo es necesario emplear un proceso específico. Se considera una energía ecoamigable, siempre que la energía usada para generarlo sea renovable, llamado hidrógeno verde y sirve para producir energía eléctrica o algún otro tipo de energía. Posee características muy llamativas,

como elevada de almacenaje, mejor transformación de energía, amigable con la naturaleza, producción energética renovable y elevada energía específica (Wu *et al.*, 2021).

La Figura 3 muestra el símbolo y sus propiedades químicas del elemento hidrógeno.



Figura 3. Símbolo del hidrógeno.

Fuente: (Andreu *et al.*, 2020).

Sobre la producción de hidrógeno, al no encontrarse de forma directa disponible en la naturaleza, se hace uso de distintas materias primas que están compuestas de hidrógeno y otros elementos, pudiendo usarse el agua, biomasa, gas natural, entre otras. Se puede decir, que el 96% o más de la producción de hidrógeno mundial se logra empleando energías primarias o fuentes no renovables como son los combustibles del tipo fósil (Wu *et al.*, 2021).

En la Figura 4 se puede apreciar las formas viables para producir hidrógeno verde de forma sostenible y amigable, al utilizar fuentes de energía renovables entre las cuales se tiene a la energía solar, eólica, geotérmica, biomasa, hidroeléctrica, nuclear y también por energías primarias no renovables como carbón, petróleo y gas (Wu *et al.*, 2021).

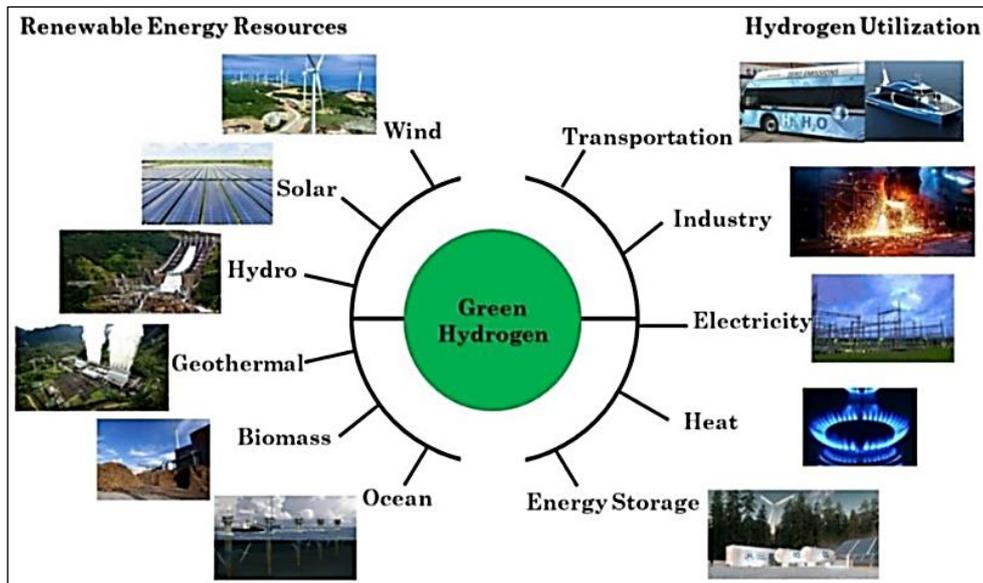


Figura 4. Formas viables de generación de hidrógeno verde y su aplicación
Fuente: (Boongaling *et al.*, 2022).

La Figura 5 muestra cómo se puede producir hidrógeno a partir de distintas tecnologías y energías renovables y no renovables.

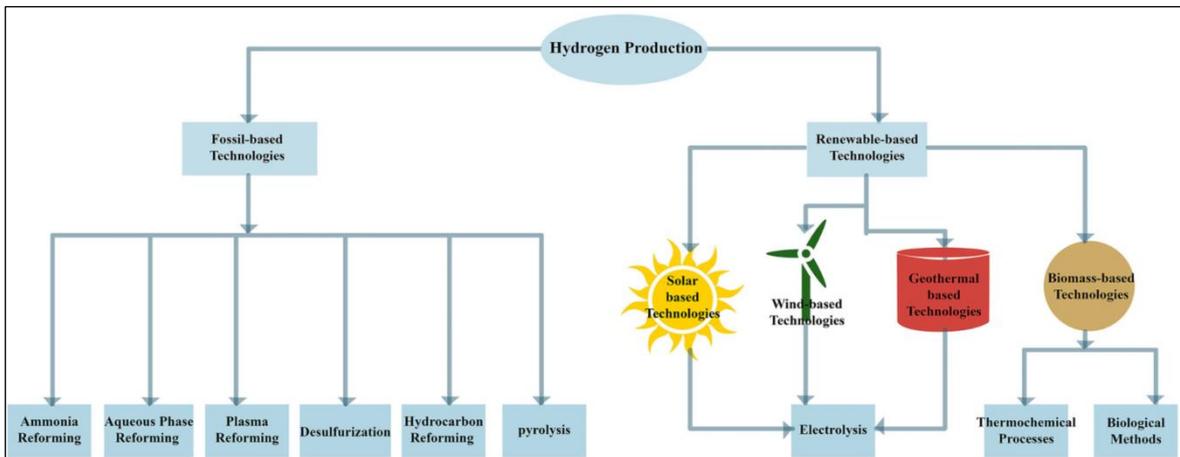


Figura 5. Rutas convencionales para generar hidrógeno verde
Fuente: (Ghazvini *et al.*, 2019)

El proceso de electrólisis del agua, es aquel proceso que hace uso de la energía eléctrica para separar las moléculas del agua en oxígeno e hidrógeno (Park *et al.*, 2020), dicho proceso se puede apreciar en la Figura 6. Dicho proceso ha sido utilizado desde hace mucho tiempo, aproximadamente hace 120 años en la industria, esto es, desde 1900.

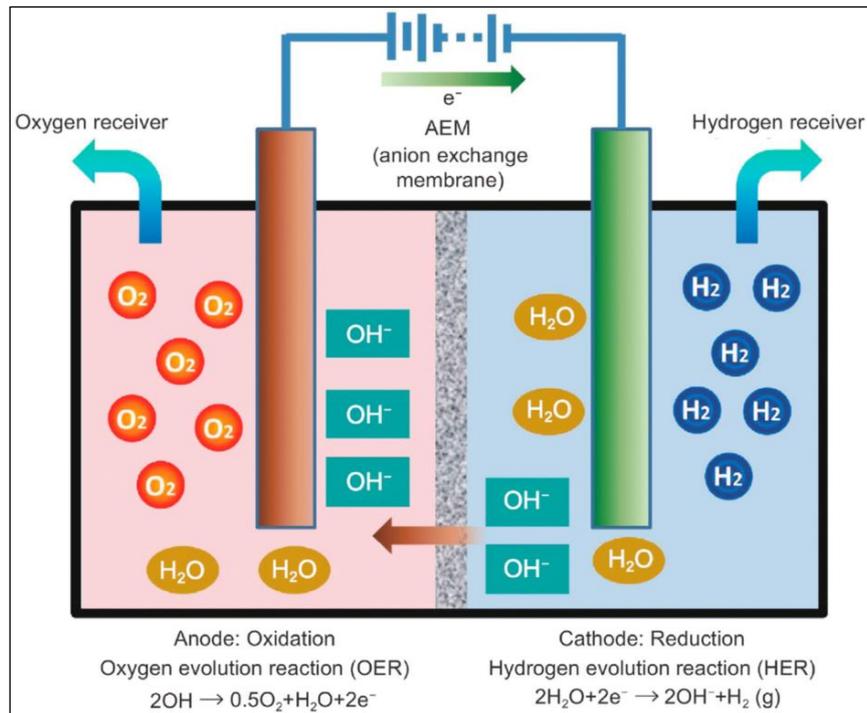


Figura 6. Proceso de electrólisis del peróxido de hidrógeno

Fuente: (Park *et al.*, 2020)

Respecto a los ciclos termodinámicos de potencia, entre los ciclos de potencia más empleados para centrales geotérmicas se encuentra al Ciclo Rankine (ver Figura 7), el cual se detalla a continuación:

Ciclo Rankine ideal: Es un ciclo ideal empleado en muchas plantas eléctricas de vapor o centrales térmicas (Cengel *et al.*, 2019). Se compone de 4 procesos:

- a. Bomba: proceso de compresión a entropía constante.
- b. Caldera: proceso de adherencia de calor de manera isobárica.
- c. Turbina: proceso de expansión a entropía constante.
- d. Condensador: proceso de expulsión de calor de manera isobárica.

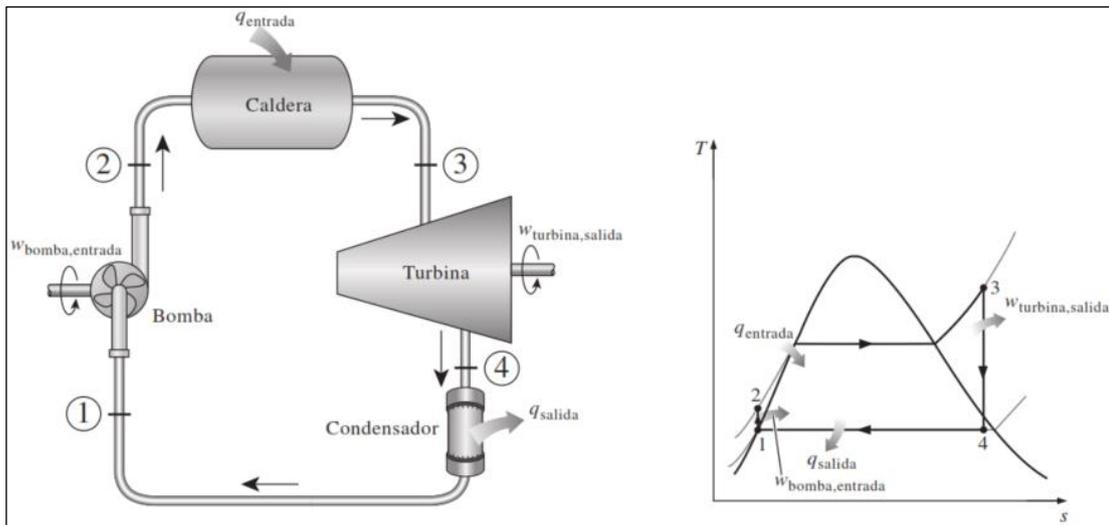


Figura 7. Esquema ideal y diagrama termodinámico del ciclo Rankine

Fuente: (Cengel *et al.*, 2019)

Ciclo Rankine real: Este ciclo tiene una diferencia notable con respecto al ideal, ya que se consideran las irreversibilidades en sus equipos y componentes. Por ejemplo, el fluido posee fricción y existen pérdidas de calor dirigidas al entorno que vienen a ser las fuentes generalmente que ocasionan las mayores irreversibilidades, como se puede apreciar en la Figura 8 (Cengel *et al.*, 2019).

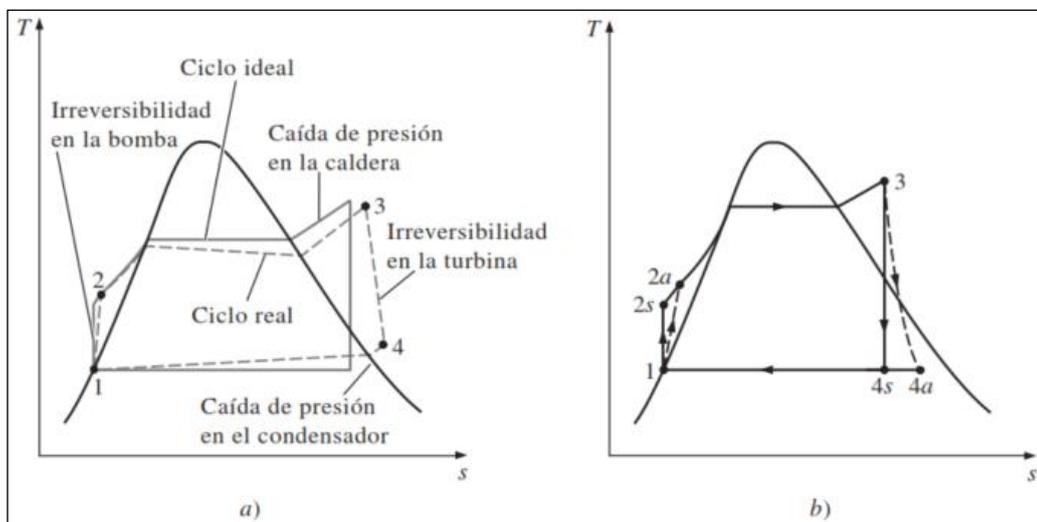


Figura 8. a) Diagrama del ciclo real. b) Irreversibilidades en la turbina y bomba

Fuente: (Cengel *et al.*, 2019).

Ciclo binario de vapor: En los ciclos de potencia Rankine, el fluido de trabajo empleado por lo general es el agua. Se puede mencionar que es el mejor fluido disponible actualmente, pero se aleja bastante de ser el ideal. El ciclo binario viene a ser el intento para lograr superar algunas deficiencias del agua y lograr una

aproximación considerable al fluido de trabajo ideal, al utilizarse dos fluidos de trabajo, tal como se puede visualizar en la Figura 9 (Cengel *et al.*, 2019).

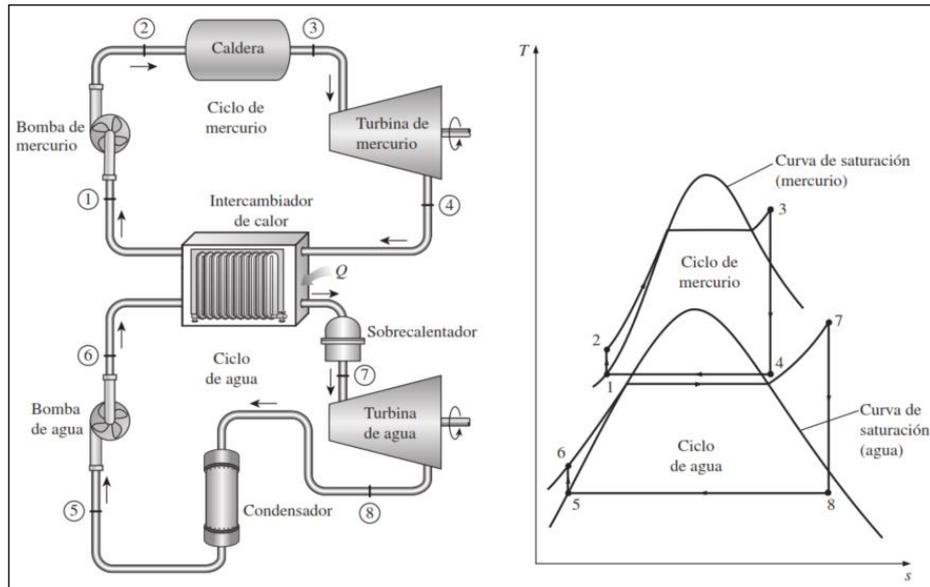


Figura 9. Ejemplo de Ciclo binario de potencia

Fuente: (Cengel *et al.*, 2019).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación

El tipo de investigación que se empleó en el actual estudio fue aplicada, de acuerdo con Hidalgo *et al.* (2021), se hizo uso de las teorías, fórmulas y definiciones en función al tema que se está investigando para responder a los objetivos propuestos y que a la vez se crea nuevo conocimiento. En la presente investigación se hizo uso de la termodinámica para poder dar respuesta a los objetivos planteados, además de realizar un análisis económico para determinar los indicadores de rentabilidad como el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), tiempo de retorno de la inversión o Payback.

Diseño de investigación

El diseño de investigación fue no experimental, porque de acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), no se alteraron o manipularon las variables de forma arbitraria, sino que conforme se han encontrado en la realidad, se realizó el análisis y del mismo modo, brindar respuesta a cada objetivo específico propuesto en el estudio actual. Es decir, de acuerdo con información brindada por el informe de JICA (2012), se extrajeron los datos para luego seleccionar los más adecuado para el desarrollo de la presente investigación.

3.2. Variables y operacionalización

Variable independiente: Energía geotérmica

Energía del subsuelo que se puede extraer como calor desde el interior de la Tierra, para poder ser aprovechada de forma factible y rentable. Es necesario tener conocimiento de sus parámetros de operación, costos de explotación y costos de O y M, que son indicadores de la dimensión características de funcionamiento (Tim *et al.*, 2019).

Variable dependiente: Hidrógeno verde

El hidrógeno es uno de los elementos que más abunda en el mundo y también el más simple. Pero no se encuentra libre en la Tierra, esto es, en estado gaseoso, pero se encuentra combinado con múltiples elementos, por ejemplo, con el Oxígeno

formando agua, con el Carbono formando Hidrocarburos y así con diferentes elementos (Fernández, 2022).

En el Anexo 1 se detalla la tabla de operacionalización de variables.

3.3. Población, muestra, muestreo

Población: Todos los campos geotérmicos del departamento de Arequipa, que vienen a ser 9.

Muestra: Campo geotérmico Chivay Pinchollo.

Muestreo: No probabilístico.

Unidad de análisis: Campo geotérmico Chivay Pinchollo.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas de recolección de datos

Análisis documental

Esta técnica llamada análisis documental permitió recolectar datos e información respecto a las características y propiedades de los yacimientos de energía geotérmica, plantas geotérmicas, además de la metodología a utilizar al momento de realizar el análisis termodinámico, técnico y económico, para lo cual se realizó un análisis y revisión de revistas indexadas, con prestigio académico, además de informes académicos realizados por el estado peruano respecto a la energía geotérmica.

Instrumentos de recolección de datos

Ficha de registro de datos

Este instrumento sirvió para recolectar información sobre el yacimiento geotérmico en estudio, datos como temperatura, presión, posible entalpía de extracción, potencia a generar, los cuales sirvieron para realizar el análisis termodinámico y posteriormente, hacer el análisis sobre la generación de hidrógeno verde y oxígeno, y al final, realizar el análisis de rentabilidad, calculando los indicadores como el VAN, TIR, Payback y relación beneficio costo. La información extraída no fue necesario que se valide, ya que ha sido analizada por otro investigador y esto le da validez. Para lograr todo esto, se empleó el informe realizado por JICA (2012).

3.5. Procedimientos

Los pasos o procedimientos empleados se detallan seguidamente:

- Primero se seleccionó el mejor fluido orgánico de trabajo y su tabla de propiedades termodinámicas con el propósito de realizar el análisis termodinámico, esto se consiguió por medio de un análisis comparativo para múltiples fluidos de entre lo más comerciales y usados en el sector, permitiendo optimizar el ciclo termodinámico de potencia propuesto.
- Seguidamente, se determinó las características o parámetros operacionales para los ciclos que son sometidos a un análisis comparativo, como el ciclo Orgánico Rankine, ciclo Binario Modificado con separación Flash y ciclo Binario Doble Flash, entre los cuales se tuvo a la temperatura de entrada y salida en la turbina, la presión máxima y mínima empleados en los dispositivos seleccionados, la producción de potencia, el flujo de masa geotérmico y fluido orgánico de trabajo, la temperatura de entrada y salida en el intercambiador de calor.
- Luego, con el uso de las tablas de propiedades termodinámicas, se calcularon los parámetros restantes, empleando la interpolación en los casos requeridos.
- Con el propósito de comprobar que los parámetros calculados son correctos se empleó el software Computer Aided Thermodynamic Table 3, el cual permitió efectuar un análisis de comparación.
- Se calculó las eficiencias térmicas reales del ciclo Orgánico Rankine, ciclo Binario Modificado con separación Flash y ciclo Binario Doble Flash, para determinar cuál es mejor para utilizar en el campo geotérmico Chivay Pinchollo, todo esto, de forma teórica con los parámetros obtenidos de las tablas termodinámicas.
- Posteriormente, se determinó la cantidad de energía eléctrica que se genera para luego ser empleada por medio de un electrolizador para producir hidrógeno y oxígeno.
- Para determinar los indicadores de rentabilidad, se utilizó el costo nivelado del hidrógeno verde, además del costo del oxígeno, el ahorro en energía eléctrica, el costo de inversión, los costos de operación y mantenimiento, entre otros,

todo ello se ingresó al programa Microsoft Excel 2021 para el análisis de rentabilidad y determinar los parámetros como el VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa interna de retorno) y tiempo de recuperación de la inversión, con la finalidad de analizar si es factible y rentable generar hidrógeno verde además de oxígeno empleando energía geotérmica. Para realizar el esquema de la central geotérmica se empleó el software AutoCAD 2022.

En la Figura 10 se muestra el esquema de los procedimientos a seguir:

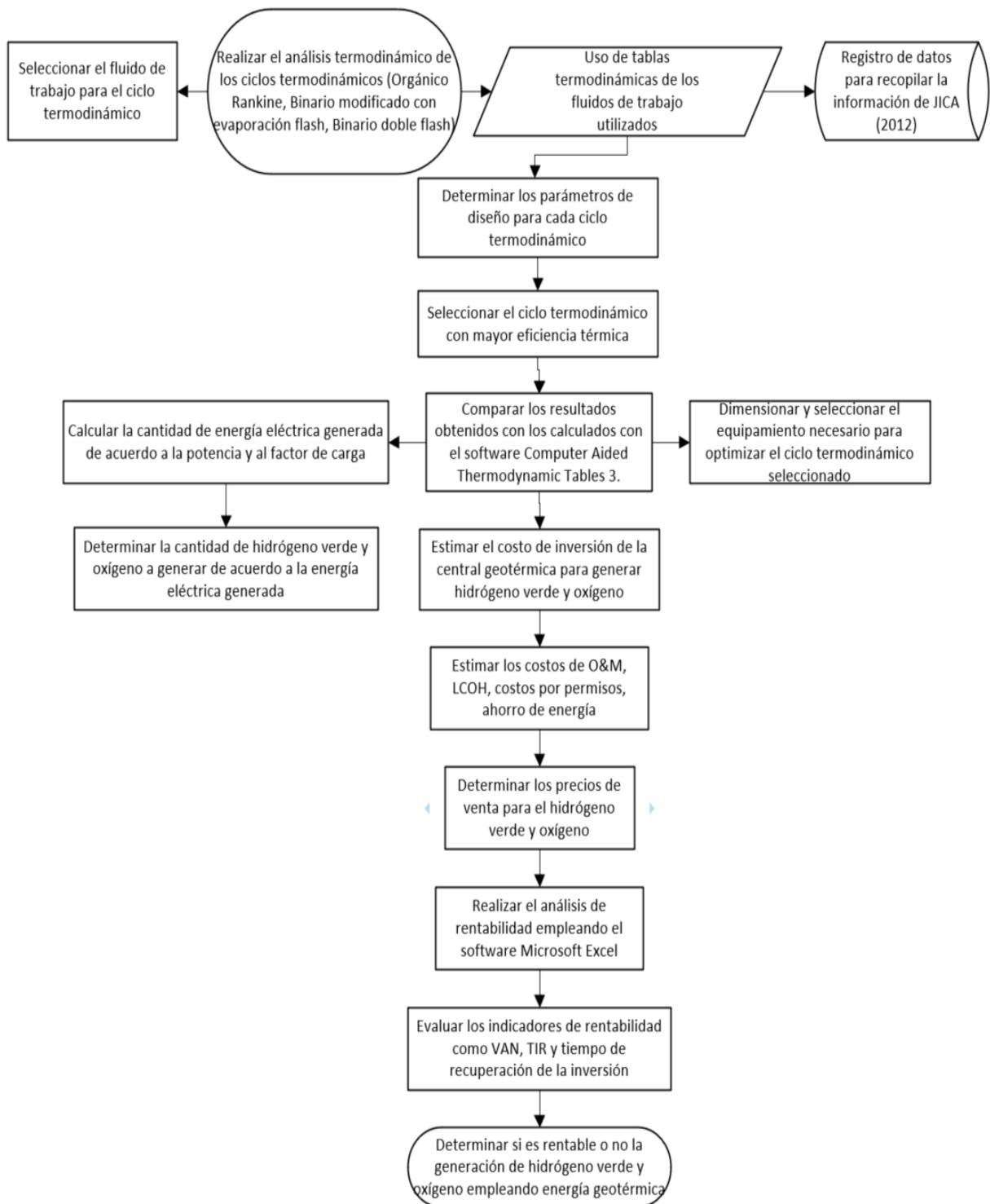


Figura 10. Esquema de los procedimientos a seguir para desarrollar los objetivos planteados.

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Método de análisis de datos

La información que se obtuvo de la presente investigación fue procesada de forma manual empleando el gestor de ecuaciones de Microsoft Word, además de la calculadora Casio fx-570 al momento de realizar los cálculos y se comprobaron empleando el software "Computer Aided Thermodynamic Tables 3", además del software Microsoft Excel 2021.

3.7. Aspectos éticos

Toda la información, artículos e investigaciones utilizadas para lograr desarrollar la actual investigación, no fueron alteradas ni manipuladas, esto es, siempre se consideró y tomó en cuenta la normativa vigente para citar y referenciar al material bibliográfico y autores consultados, es decir, se utilizó la norma ISO 690, tal cual lo solicita la Universidad César Vallejo (UCV). Adicionalmente, se tuvo en consideración la guía y orientación de un asesor, con el propósito de poder elaborar de forma correcta y adecuada la actual investigación, y todo el análisis sea lo más real posible y evitando siempre todo tipo de copia o plagio, esto para siempre mantener la originalidad de la investigación.

IV. RESULTADOS

4.1. Características de los ciclos termodinámicos

De acuerdo con Cengel *et al.* (2019), entre las características importantes del ciclo termodinámico, se tienen las siguientes:

1. Ciclo Rankine Orgánico

a. Bomba

Se encarga de aumentar la presión del fluido de trabajo para poder romper y vencer la fricción en las tuberías y así poder continuar con la siguiente etapa o proceso, ya que se requiere una presión elevada. Funciona a temperatura y volumen constante debido a que el fluido empleado es incompresible y la diferencia de temperatura en la entrada y la salida es prácticamente cero, es decir, muy bajo.

b. Intercambiador de calor

Es el encargado de calentar el fluido de trabajo, es decir, de realizar la transferencia de calor para obtener vapor saturado o sobrecalentado a una presión alta para un mejor aprovechamiento. Funciona isobáricamente, es decir, a presión constante.

c. Turbina

Equipo encargado de convertir o transformar la energía térmica del vapor en trabajo de flecha, puede ser de una o varias etapas, de baja, media y alta presión. El vapor generado hace mover los álabes que son unas asas que giran a altas velocidades o revoluciones y con un torque elevado originado por la presión del fluido en forma de vapor. Funciona isoentrópicamente, esto es, con una entropía constante.

d. Condensador

Se encarga de reducir la temperatura del vapor a la salida de la turbina y que se vuelva a transformar en fluido en líquido saturado, funciona a baja presión debido a que a la salida de la turbina el fluido pierde gran parte de su presión. A la salida del condensador se tiene a la bomba para que se repita el ciclo. Funciona isobáricamente.

e. Generador

Equipo que se encarga de convertir la energía eléctrica generada en la turbina para ser aprovechable. Se tienen en distintas configuraciones de voltaje, eficiencia y factor de potencia.

f. Electrolizador

Es el equipo encargado de separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno por medio del proceso llamado “Electrólisis del agua”, que luego pueden ser almacenados para su posterior uso en lo que sea requerido.

En la Figura 11 se puede apreciar el esquema de configuración para el posterior análisis del Ciclo Rankine Orgánico.

Selección del fluido orgánico de trabajo

En el mercado existen muchos fluidos de trabajo, entre los cuales se tiene al Diclorofluorometano (R12), Tetrafluorometano (R134a), Tetrafluorometano + Pentafluorometano (R410a), Isobutano (R600a) y el Isopentano (R601a). De los cuales el que más sobresale por sus propiedades y características es el R410a, con un grado de contaminación nulo, un poder calorífico elevado, un precio bastante accesible en el mercado, no es tóxico para el ser humano y tampoco es inflamable, lo que hace que sea la mejor opción a usarse para el ciclo termodinámico seleccionado en la presente investigación. Esto en consideración con lo investigado por Trujillo y Pérez (2022), quienes de su análisis efectuado a los distintos fluidos orgánicos de trabajo, concluyeron que el R410a es el mejor para ser empleado en un Ciclo Orgánico Rankine.

Las tablas termodinámicas se pueden apreciar en el Anexo 3, que fueron tomadas del libro Fundamentos de Termodinámica de los autores Borgnakke y Sonntag (2019).

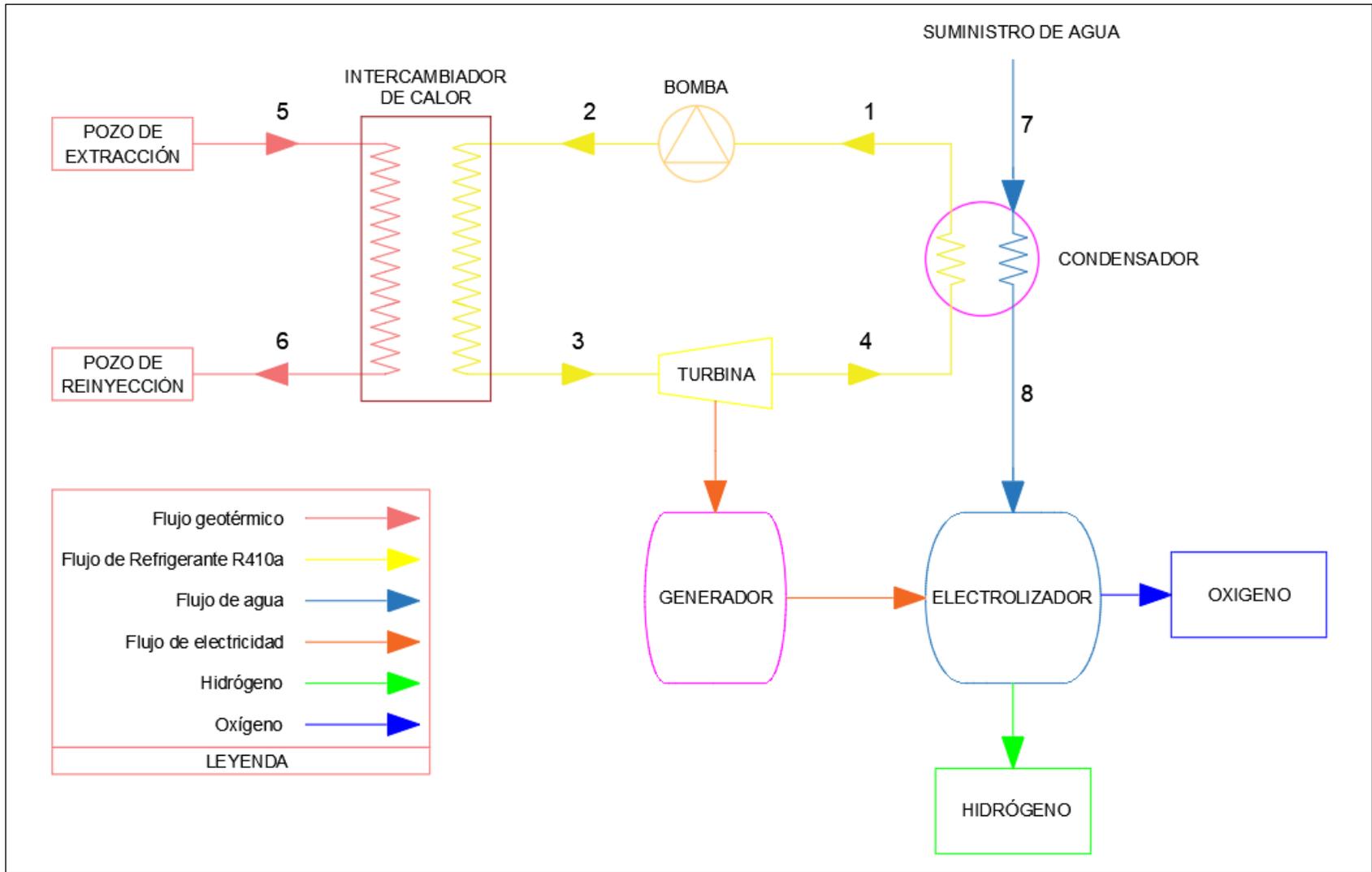


Figura 11. Esquema termodinámico del Ciclo Orgánico Rankine.

Fuente: Elaboración propia.

2. Ciclo Binario modificado con evaporación flash

De acuerdo con Salazar *et al.* (2017), este ciclo emplea en su configuración al fluido de trabajo llamado R410a, con los siguientes equipos:

a. Intercambiador de calor

Encargado de proporcionar el calor al amoníaco por medio de la mezcla bifásica obtenida del pozo geotérmico para que el amoníaco se convierta en una mezcla de líquido saturado y vapor saturado.

b. Separador

Se encarga de separar el líquido saturado del vapor saturado para que el vapor saturado se convierta en vapor sobrecalentado y pueda ser empleado en la turbina.

c. Sobrecalentador

Encargado de proporcionar el calor al vapor saturado de amoníaco, para convertirlo en vapor sobrecalentado para ser empleado en la turbina.

d. Turbina

Encargado de producir la energía eléctrica por medio de la expansión del vapor sobrecalentado en el interior del eje de la turbina, que, acoplado a un generador, se pueda utilizar en el electrolizador.

e. Absorbedor

Encargado de mezclar el fluido a la salida de la turbina y a la salida del difusor, para que posteriormente se convierta en líquido saturado o subenfriado para pasar luego por la bomba y se comprima.

f. Difusor

Encargado de bajar la presión del fluido a la salida del regenerador, pero mantiene la entalpía.

g. Regenerador

Encargado de aumentar la temperatura del fluido de trabajo, trabaja como un intercambiador de calor, ya que utiliza el calor del fluido a la salida del separador para calentar el fluido a la salida de la bomba.

h. Condensador

Encargado de disminuir la temperatura del fluido de trabajo a la salida del absorbedor, para que pueda ser comprimido en la bomba, funciona como un intercambiador de calor y se usará para precalentar el agua de alimentación para el electrolizador.

i. Bomba de agua de enfriamiento

Encargado de aumentar la presión del suministro de agua al electrolizador.

j. Bomba de fluido de trabajo

Proporciona la presión adecuada para utilizar el fluido de trabajo comprimido que es el amoniaco para aprovechar al máximo su potencial energético.

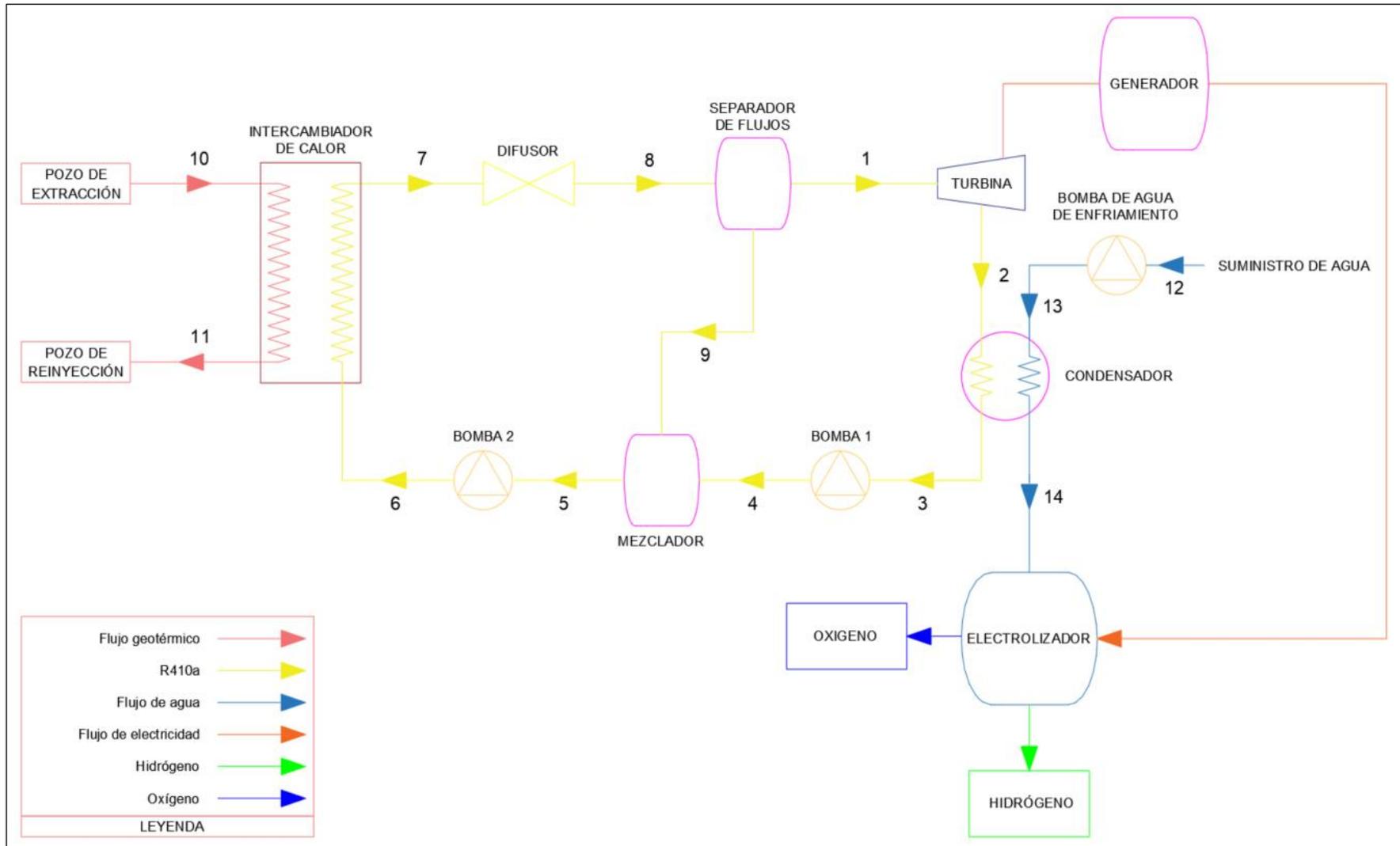


Figura 12. Esquema del Ciclo Binario modificado con evaporación flash.

Fuente: Elaboración propia.

3. Ciclo Binario Flash

De acuerdo con Salazar *et al.* (2017), realizando un análisis respecto de varios ciclos de potencia para centrales geotermoeléctricas, como de vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos, concluyeron que el ciclo flash con dos cámaras flash es el más adecuado, porque se tiene el mejor rendimiento y eficiencia térmica, además de mejorar los costos, y reducir las pérdidas de energía. Por lo que, para la presente investigación, se realizó un análisis de un Ciclo Binario Flash con dos cámaras. Los componentes empleados en un Ciclo Binario Flash, se tienen los siguientes:

a. Cámaras Flash

Llamada también cámara de evaporación instantánea, donde se origina una pérdida de presión convirtiendo el líquido o fluido en vapor.

b. Separador

Dispositivo empleado para separar el líquido saturado del vapor saturado, donde el líquido saturado se queda por debajo del vapor saturado.

c. Turbina de alta presión

Equipo que sirve para convertir la energía entálpica del vapor a alta presión en una primera etapa.

d. Turbina de baja presión

Equipo que sirve para convertir la energía entálpica del vapor a baja presión en una segunda etapa.

e. Condensador

Encargado de disminuir la temperatura del fluido de trabajo a la salida del absorbedor, para que pueda ser comprimido en la bomba, funciona como un intercambiador de calor y se usará para precalentar el agua de alimentación para el electrolizador.

f. Generador

Equipo que se encarga de convertir la energía eléctrica generada en la turbina para ser aprovechable. Se tienen en distintas configuraciones de voltaje, eficiencia y factor de potencia.

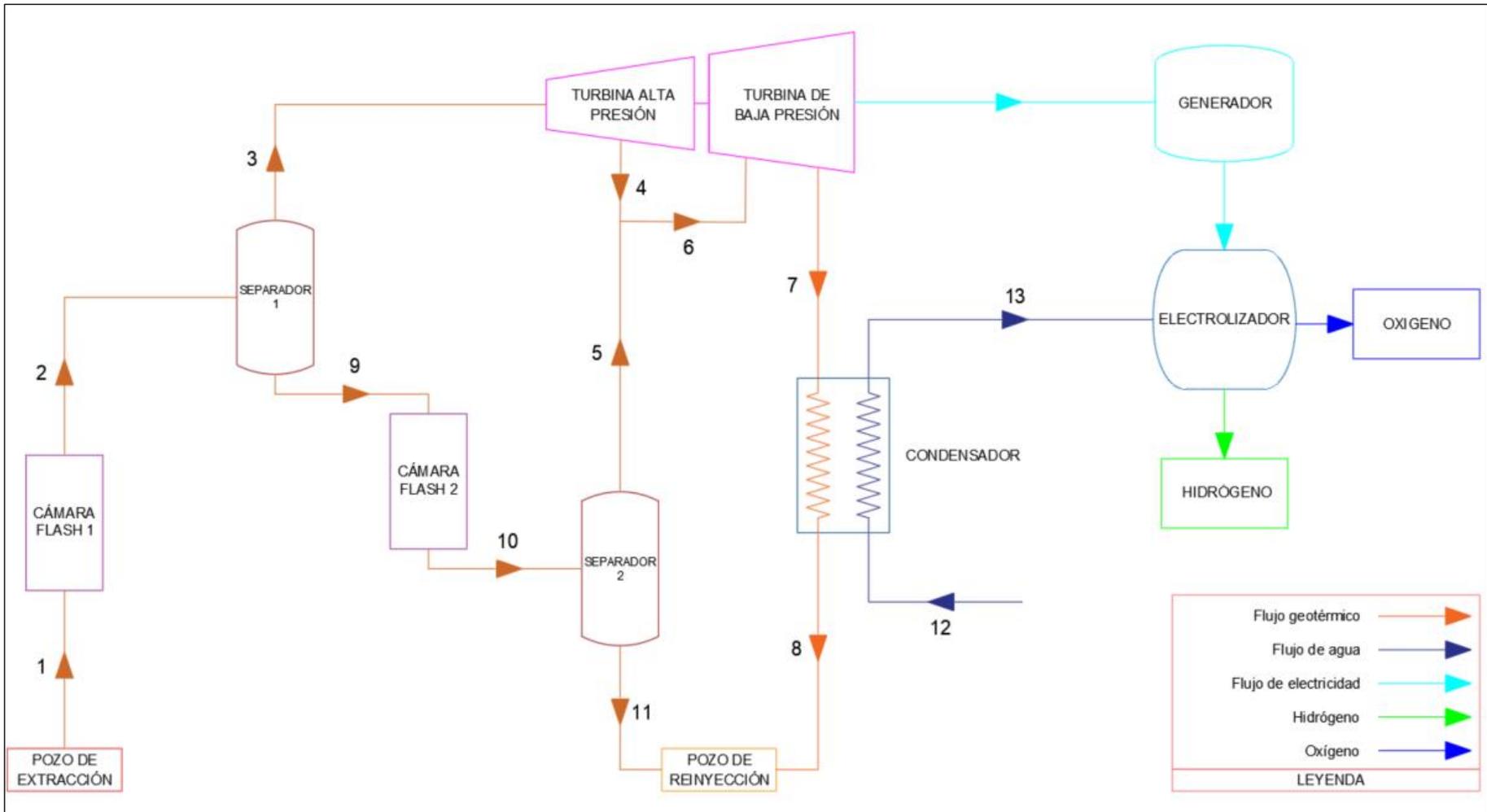


Figura 13. Esquema termodinámico del Ciclo Binario Doble Flash.

Fuente: Elaboración propia.

Campo geotérmico Chivay – Pinchollo

Ubicado en el departamento de Arequipa, posee un potencial de recursos para generación de energía eléctrica de 169,2 MWe, pero la capacidad posible o potencia de desarrollo es de 150 MWe, de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Potencial y capacidad posible de desarrollo en campos geotérmicos

Nombre del campo	Potencial de Recursos P80 (MWe)	Capacidad posible de desarrollo (MWe)
Chungara-Kallapuma	840	75
Ancocollo	982	90
Tutupaca	113,8	105
Crucero	794	70
Pinaya	368	35
Calacoa-Putina	108,2	100
Ulucan	274	25
Jesús María	173	10
Ccollo/Titire	397	35
Cailloma	91	5
Chivay - Pinchollo	162,9	150
Puquio	343	30
Chancos	153	5
Total	826,4	735

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

Presión atmosférica

La localidad de Chivay se encuentra a una altitud de 3 551 m.s.n.m., por lo que empleando la fórmula siguiente, se calcula la presión en kPa (Cengel y Cimbala, 2015).

$$P_{local} = P_{atm.estandar} \left(1 - \frac{\alpha * Z}{T_0} \right)^{g/\alpha R}$$

$$P_{local} = 101\,325\ Pa \times \left(1 - \frac{0.0065 \times 3\,551}{288.15} \right)^{5.26} = 65\,311\ Pa = 65.311\ kPa$$

4.2. Análisis comparativo entre los ciclos termodinámicos

Análisis termodinámico Ciclo Orgánico Rankine

El análisis parte de la Figura 11, por lo tanto, se tuvo lo siguiente:

Estado 1: En este estado, el fluido de trabajo se encuentra como líquido saturado, y sus propiedades termodinámicas se calculan de acuerdo a la presión y fase

encontrada, por lo que se obtuvo lo siguiente:

$$P_1 = 65.311 \text{ kPa}$$

Tabla 2. Interpolación para calcular T_1

Temperatura (°C)	Presión (kPa)
-60	64.1
T_1	65.311
-55	84

Fuente: Elaboración propia.

$$T_1 = -60 + (-55 - -60) \left(\frac{65.311 - 64.1}{84 - 64.1} \right) = -59.70 \text{ °C}$$

Tabla 3. Interpolación para calcular s_1

Entropía (kJ/kg. K)	Presión (kPa)
-0.1227	64.1
s_1	65.311
-0.0912	84

Fuente: Elaboración propia.

$$s_1 = -0.1227 + (-0.0912 - -0.1227) \left(\frac{65.311 - 64.1}{84 - 64.1} \right) = -0.1208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Tabla 4. Interpolación para calcular h_1

Entalpía (kJ/kg)	Presión (kPa)
-27.45	64.1
h_1	65.311
-20.64	84

Fuente: Elaboración propia.

$$h_1 = -27.45 + (-20.64 - -27.45) \left(\frac{65.311 - 64.1}{84 - 64.1} \right) = -27.0356 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tabla 5. Datos para calcular v_1

Volumen específico (m³/kg)	Presión (kPa)
0.000727	64.1
v_1	65.311
0.000735	84

Fuente: Elaboración propia.

$$v_1 = 0.000727 + (0.000735 - 0.000727) \left(\frac{65.311 - 64.1}{84 - 64.1} \right) = 0.0007275 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Estado 2: En este estado se ubica la entrada de la bomba, la cual se encarga de comprimir al fluido de trabajo, por lo que se calcula el trabajo específico de la bomba, empleando el volumen específico del fluido en líquido saturado por la diferencia de presiones y así calcular la entalpía a la salida de la bomba de la siguiente manera:

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

$$w_{b,e} = v_1 \cdot (P_2 - P_1) = 0.0007275 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (4\,000 - 65.311) \text{ kPa} = 2.8624 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 + w_{b,e} = -27.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2.8625 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -24.173 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para calcular la temperatura en este estado, se utilizaron los datos de temperatura y entalpía en el rango determinado, y con la suposición que se encuentra en saturación, es decir, como líquido saturado a la temperatura:

Tabla 6. Interpolación para calcular T_2

Entalpía (kJ/kg)	Temperatura (°C)
-27.45	-60
-24.173	T_2
-20.64	-55

Fuente: Elaboración propia.

$$T_2 = -60 + (-55 - -60) \left(\frac{-24.173 - -27.45}{-20.64 - -27.45} \right) = -57.59 \text{ °C}$$

Estado 3: En la entrada del intercambiador de calor se tiene líquido saturado con una presión de 4 MPa, y a su salida dicho líquido saturado se convierte en vapor sobrecalentado, obteniéndose lo siguiente:

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

$$T_3 = 120 \text{ °C}$$

$$h_3 = 367.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_3 = 0.00897 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$s_3 = 1.1529 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Estado 4: La turbina considerada es isoentrópica, es decir, la entropía en la entrada es la misma que en la salida, entonces se obtiene que:

$$P_4 = 65.311 \text{ kPa}$$

$$s_4 = s_3 = 1.1529 \frac{kJ}{kg.K}$$

Interpolando con los datos obtenidos, se calculó y obtuvo los siguientes datos:

$$T_4 = -60 \text{ } ^\circ C$$

$$s_{4f} = -0.1227 \frac{kJ}{kg.K} \qquad s_{4g} = 1.1907 \frac{kJ}{kg.K}$$

La calidad en la salida de la turbina es:

$$x_4 = \frac{s_4 - s_{4f}}{s_{4g} - s_{4f}} = \frac{(1.1529 - -0.1227) \frac{kJ}{kg}}{(1.1907 - -0.1227) \frac{kJ}{kg}} = 0.9712$$

La entalpía en la salida es:

$$h_{4f} = -27.45 \frac{kJ}{kg} \qquad h_{4g} = 252.51 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = h_{4f} + x_4(h_{4g} - h_{4f}) = -27.45 \frac{kJ}{kg} + 0.9712 (252.51 - -27.45) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = 244.447 \frac{kJ}{kg}$$

El volumen específico es:

$$v_{4f} = 0.000727 \frac{m^3}{kg} \qquad v_{4g} = 0.36845 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_4 = v_{4f} + x_4(v_{4g} - v_{4f}) = 0.000727 \frac{m^3}{kg} + 0.9712 (0.36845 - 0.000727) \frac{m^3}{kg} = 0.35786 \frac{m^3}{kg}$$

Ahora, empleando las eficiencias isentrópicas de la turbina y la bomba para que el ciclo sea lo más real posible, se obtuvo lo siguiente:

$$\eta_b = 80\% = 0.80$$

$$w_{b,r} = \frac{w_{b,e}}{\eta_b} = \frac{2.8624 \frac{kJ}{kg}}{0.80} = 3.578 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2r} = h_1 + w_{b,r} = -27.0356 \frac{kJ}{kg} + 3.578 \frac{kJ}{kg} = -23.4576 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla 7. Interpolación para calcular T_{2r}

Entalpía (kJ/kg)	Temperatura (°C)
-27.45	-60
-23.4576	T_{2r}
-20.64	-55

Fuente: Elaboración propia.

$$T_{2r} = -60 + (-55 - -60) \left(\frac{-23.4576 - -27.45}{-20.64 - -27.45} \right) = -57.07 \text{ °C}$$

$$\eta_t = 90\% = 0.9$$

$$w_{t,i} = h_3 - h_4 = 367.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 244.447 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 122.843 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{t,r} = \eta_t \times w_{t,i} = 0.9 \times 122.843 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 110.559 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{4r} = h_3 - w_{t,r} = 367.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 110.559 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 256.731 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

En el intercambiador de calor, el calor que entra es:

$$q_e = h_3 - h_{2r} = 367.29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - -23.4576 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 390.7476 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Luego, se calculó el trabajo de bomba y turbina de forma ideal, obteniendo lo siguiente:

$$w_{b,e} = 2.8624 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \qquad w_{t,i} = 122.843 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Por lo tanto, el trabajo neto ideal calculado fue:

$$w_{neto,i} = w_{t,i} - w_{b,e} = 122.843 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2.8624 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 119.9806 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Seguidamente, se calcularon los trabajos reales de la bomba y turbina, obteniendo lo siguiente:

$$w_{b,r} = 3.578 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \qquad w_{t,r} = 110.559 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Por lo que el trabajo neto real calculado fue:

$$w_{neto,r} = w_{t,r} - w_{b,r} = 110.559 \frac{kJ}{kg} - 3.578 \frac{kJ}{kg} = 106.981 \frac{kJ}{kg}$$

De los datos obtenidos del campo geotérmico, en relación a la potencia que se puede explotar que es de 150 MW (Tabla 1), se procedió a calcular el flujo de masa del fluido orgánico de trabajo, entonces se obtuvo que:

$$\dot{W}_{neto} = 150 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{R410a} = \frac{\dot{W}_{neto}}{w_{neto,r}} = \frac{150 \times 10^3 \frac{kJ}{s}}{106.981 \frac{kJ}{kg}} = 1402.12 \frac{kg}{s}$$

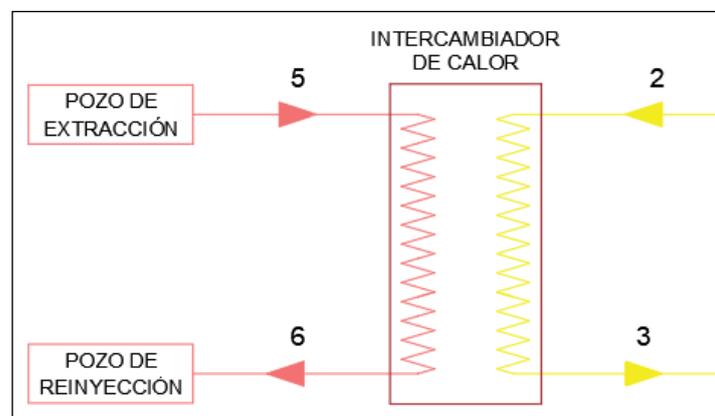


Figura 14. Esquema del intercambiador de calor

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, se emplearon los datos de la temperatura en la entrada y salida del intercambiador de calor, para calcular lo siguiente:

$$T_3 = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{2r} = -57.07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

$$C_{p agua} = 4.2355 \frac{kJ}{kg.K} \text{ (Anexo 8)}$$

$$\dot{m}_{R410a} = 1402.12 \frac{kg}{s}$$

Determinando el calor en el intercambiador de calor:

$$\dot{Q}_{ic} = \dot{m}_{R410a} \cdot C_{p R410a} \cdot (T_3 - T_{2r}) = 1\,402.12 \frac{kg}{s} \times 1.335 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times (140 - -57.07) K$$

$$\dot{Q}_{ic} = 368\,881.58 kW$$

Se calculó el flujo de masa que se debe extraer en el pozo de extracción, obteniendo que:

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{Q}_{ic}}{C_{p agua} \cdot (T_5 - T_6)} = \frac{368\,881.58 \frac{kJ}{s}}{4.2355 \frac{kJ}{kg \cdot K} \times (120 - 60) K} = 1\,451.55 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_g = 5\,225\,568.33 \frac{kg}{h}$$

$$\rho_{agua} = 952.50 \frac{kg}{m^3} \text{ (Anexo 7)}$$

$$\dot{V}_{fluido.geot\acute{e}rmico} = 5486.16 \frac{m^3}{h}$$

Tabla 8. Resumen del Ciclo Orgánico Rankine – Cálculo manual

Estado	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg. K)	Calidad (x)	Fase
1	0.065311	-59.65	-26.98	-0.1205	0	Líquido saturado
2	4.00	-57.59	-24.17	-0.1074	-	Líquido saturado
2r	4.00	-57.07	-23.46	-0.1042	-	Líquido saturado
3	4.00	120	367.29	1.1529	-	Vapor sobrecalentado
4	0.065311	-59.70	244.447	1.1529	0.9712	Mezcla bifásica
4r	0.065311	-54.50	256.731	-	-	Vapor sobrecalentado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Resumen comparativo de resultados.

Estado	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg. K)	Calidad (x)	Fase
1	0.065311	-59.70	-27.0356	-0.1208	0	Líquido saturado
2	4.00	-57.59	-24.173	-0.1080	-	Líquido saturado
2r	4.00	-57.07	-23.4576	-	-	Líquido saturado
3	4.00	120	367.30	1.1530	-	Vapor sobrecalentado
4	0.065311	-59.65	244.90	1.1530	0.9721	Mezcla bifásica
4r	0.065311	-54.39	256.731	1.2080	-	Vapor sobrecalentado

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis comparativo entre el cálculo manual y el cálculo con el software “*Computer Aided Thermodynamic Tables 3*” se puede verificar que la diferencia es mínima, concluyendo que las tablas empleadas con la metodología de cálculo utilizado permiten obtener los parámetros faltantes sin ningún problema.

Calculando la eficiencia térmica real del Ciclo Orgánico Rankine, de acuerdo con las fórmulas de Cengel *et al.* (2019):

$$\eta_{t\acute{e}rmica,r} = \frac{w_{neto,r}}{q_e}$$

$$\eta_{t\acute{e}rmica,r} = \frac{106.981 \frac{kJ}{kg}}{390.7476 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\eta_{t\acute{e}rmica,r} = 0.2738 \times 100\% = 27.38\%$$

Análisis termodinámico Ciclo Binario Modificado con separación flash

El análisis parte de la Figura 12, por lo tanto, se tuvo lo siguiente:

Estado 1: En este estado, el fluido de trabajo se encuentra como vapor saturado, y sus propiedades termodinámicas se calculan de acuerdo a la presión y fase encontrada, por lo que se obtuvo lo siguiente:

$$P_1 = 3 \text{ MPa}$$

$$T_1 = 49.07 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 280.002 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 0.9303 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Estado 2: En este estado, el fluido de trabajo pasa por la turbina mediante un proceso isoentrópico, por lo que se obtuvo lo siguiente:

$$P_2 = 65.311 \text{ kPa}$$

$$s_2 = s_1 = 0.9303 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Interpolando se obtienen los demás parámetros:

$$T_2 = -59.70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$s_{2f} = -0.120783 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$s_{2g} = 1.189635 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} = \frac{0.9303 - -0.120783}{1.189635 - -0.120783} = 0.8021$$

$$h_{2f} = -27.036 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2g} = 252.673 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_{2f} + x_2 (h_{2g} - h_{2f}) = -27.036 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.8021 (252.673 - -27.036) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 197.3186 \frac{kJ}{kg}$$

Estado 3: En este estado, el fluido de trabajo sale del condensador como líquido saturado, obteniendo lo siguiente:

$$P_3 = 65.311 \text{ kPa}$$

$$T_3 = -59.70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x_3 = 0$$

$$h_3 = -27.036 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_3 = 0.00072749 \frac{m^3}{kg}$$

Estado 4: En este estado, el fluido de trabajo sale de la bomba como líquido subenfriado, obteniendo lo siguiente:

$$P_4 = 3 \text{ MPa}$$

$$w_{b1} = v_3 (P_4 - P_3) = 0.00072749 \frac{m^3}{kg} (3\,000 - 65.311) \text{ kPa} = 2.135 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = h_3 + w_{b1} = -27.036 \frac{kJ}{kg} + 2.135 \frac{kJ}{kg} = -24.901 \frac{kJ}{kg}$$

Estado 5: En este estado, el fluido de trabajo sale del mezclador como líquido saturado, obteniendo lo siguiente:

$$P_5 = 3 \text{ MPa}$$

$$T_5 = 49.07 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_5 = 141.707 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_5 = 0.00109468 \frac{m^3}{kg}$$

Estado 6: En este estado, el fluido de trabajo sale de la bomba 2 como líquido subenfriado, obteniendo lo siguiente:

$$P_6 = 4 \text{ MPa}$$

$$w_{b2} = v_5 (P_6 - P_5) = 0.00109468 \frac{m^3}{kg} (4\,000 - 3\,000) \text{ kPa} = 1.09468 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_6 = h_5 + w_{b2} = 141.707 \frac{kJ}{kg} + 1.0947 \frac{kJ}{kg} = 142.8017 \frac{kJ}{kg}$$

Estado 7: En este estado, el fluido de trabajo sale del intercambiador de calor luego de transferirle calor del fluido geotérmico, convirtiéndose en líquido saturado a 4 MPa, obteniendo lo siguiente:

$$P_7 = 4 \text{ MPa}$$

$$T_7 = 61.85 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_7 = 171.468 \frac{kJ}{kg}$$

Estado 8: En este estado, el fluido de trabajo sale del difusor siendo estrangulado, reduciéndose la presión de 4 MPa a 3 MPa, obteniendo lo siguiente:

$$P_8 = 3 \text{ MPa}$$

$$h_8 = h_7 = 171.468 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{8f} = 141.707 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{8g} = 280.002 \frac{kJ}{kg}$$

$$x_8 = \frac{h_8 - h_{8f}}{h_{8g} - h_{8f}} = \frac{171.468 - 141.707}{280.002 - 141.707} = 0.2152$$

Del balance de masa y energía:

$$y' = 1 - \frac{h_5 - h_8}{h_4 - h_1} = 1 - \frac{141.707 - 171.468}{-24.901 - 280.002}$$

$$y' = 0.9024$$

Entonces, reemplazando los datos para calcular la entalpía del estado 9:

$$h_9 = \frac{h_8 - (1 - y') h_1}{y'} = \frac{171.468 - (1 - 0.9024)(280.002)}{0.9024} = 159.7294 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora, empleando las eficiencias isoentrópicas para las bombas y turbinas:

$$\eta_b = 80\% = 0.80$$

$$\eta_t = 90\% = 0.90$$

$$w_{r,b1} = \frac{w_{b1}}{\eta_b} = \frac{2.135 \frac{kJ}{kg}}{0.80} = 2.66875 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{4r} = h_3 + w_{r,b1} = -27.036 \frac{kJ}{kg} + 2.66875 \frac{kJ}{kg} = -24.36725 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{r,b2} = \frac{w_{b2}}{\eta_b} = \frac{1.09468 \frac{kJ}{kg}}{0.80} = 1.36835 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{6r} = h_5 + w_{r,b2} = 141.707 \frac{kJ}{kg} + 1.36835 \frac{kJ}{kg} = 143.07535 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo de la turbina es:

$$w_t = h_1 - h_2 = 280.002 \frac{kJ}{kg} - 197.3186 \frac{kJ}{kg} = 82.6834 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo real de la turbina es:

$$w_{r,t} = \eta_t \times w_t = 0.90 \times 82.6834 \frac{kJ}{kg} = 74.41506 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2r} = h_1 - w_{r,t} = 280.002 \frac{kJ}{kg} - 74.41506 \frac{kJ}{kg} = 205.58694 \frac{kJ}{kg}$$

Del balance de masa y energía:

$$y' = 1 - \frac{h_5 - h_8}{h_{4r} - h_1} = 1 - \frac{141.707 - 171.468}{-24.36725 - 280.002}$$

$$y' = 0.9022$$

Entonces, reemplazando los datos para calcular la entalpía del estado 9r:

$$h_{9r} = \frac{h_8 - (1 - y') h_1}{y'} = \frac{171.468 - (1 - 0.9022)(280.002)}{0.9022}$$

$$h_{9r} = 159.7027 \frac{kJ}{kg}$$

De acuerdo con Cengel *et al.* (2019), el trabajo neto real se calcula con la siguiente fórmula:

$$w_{r,neto} = (1 - y') w_{r,t} - (1 - y') w_{r,b1} - w_{r,b2}$$

$$w_{r,neto} = (1 - 0.9022) \times 74.41506 - (1 - 0.9022) \times 2.66875 - 1.36835 = 5.64844 \frac{kJ}{kg}$$

El calor de entrada es:

$$q_e = h_7 - h_{6r} = 171.468 \frac{kJ}{kg} - 143.07535 \frac{kJ}{kg} = 28.39265 \frac{kJ}{kg}$$

La eficiencia térmica es:

$$\eta_{térmica,r} = \frac{w_{r,neto}}{q_e} = \frac{5.64844 \frac{kJ}{kg}}{28.39265 \frac{kJ}{kg}} = 0.19894 \times 100\% = 19.894\%$$

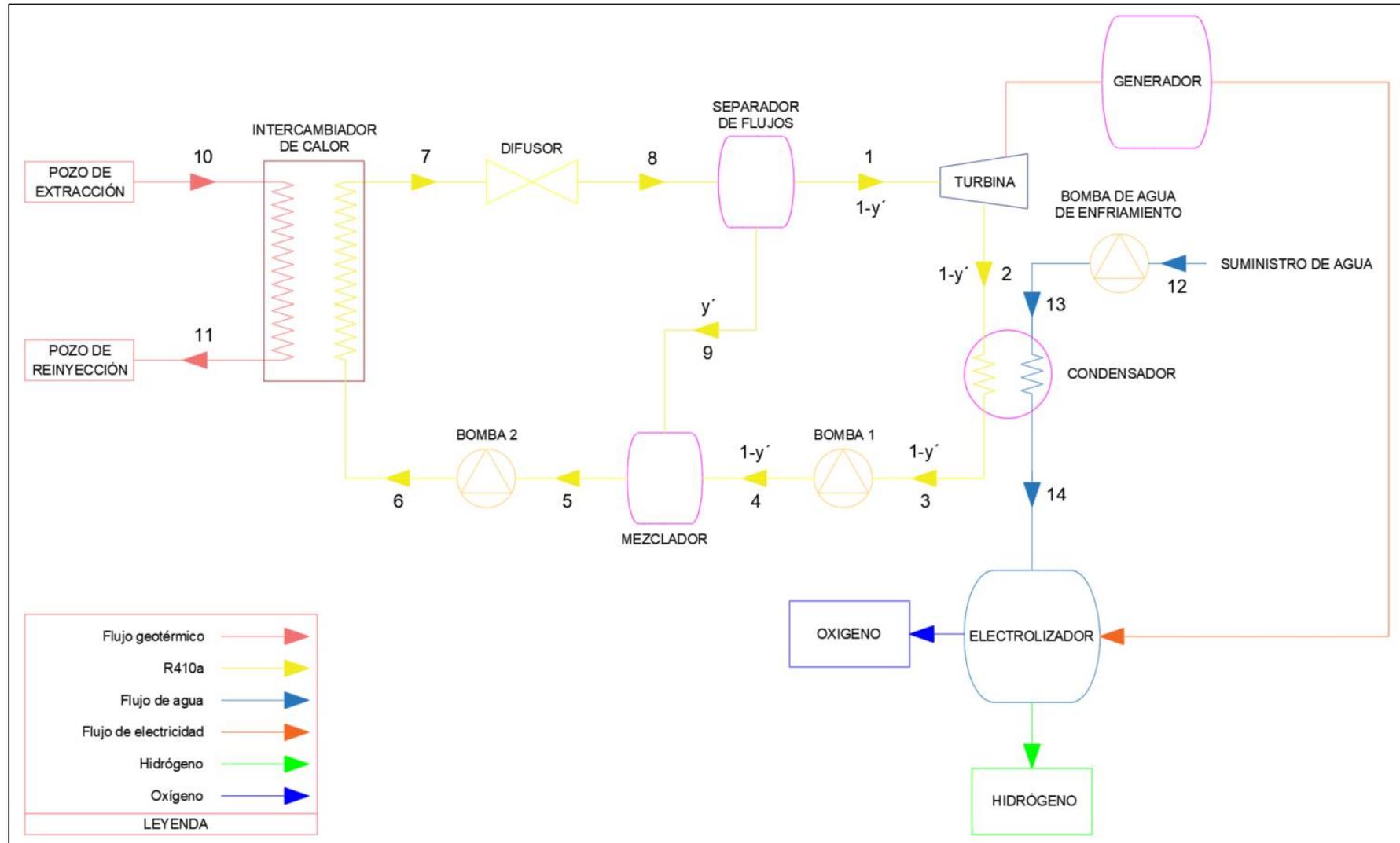


Figura 15. Ciclo binario modificado con separación flash y flujos de masa.

Fuente: Elaboración propia.

Ciclo Binario doble Flash

El análisis parte de la Figura 13, por lo tanto, se tuvo lo siguiente:

Estado 1: En este estado, se tiene la cámara flash 1, y el fluido geotérmico extraído se encuentra como líquido saturado, y sus propiedades termodinámicas se calculan de acuerdo a la presión y fase encontrada, por lo que se obtuvo lo siguiente:

$$P_1 = 4 \text{ MPa}$$

$$T_1 = 250.35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 1087.40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 2.7966 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Estado 2: En este estado, se encuentra la salida de la cámara flash 1, donde la presión se reduce, es decir, se expande el fluido de trabajo, y se mantiene la entalpía constante, esto es, la entalpía del estado 1 es igual a la del estado 2, y la fase del fluido cambia a una mezcla bifásica, por lo que se obtuvo:

$$P_2 = 2 \text{ MPa}$$

$$T_2 = 212.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_2 = h_1 = 1087.40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2f} = 908.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{2g} = 2798.30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{2f}}{h_{2g} - h_{2f}} = \frac{(1087.40 - 908.47) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(2798.30 - 908.47) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.09468$$

Estado 3: En este estado se encuentra la salida del absorbedor donde se extrae el vapor saturado para luego ser utilizado en la turbina de vapor, empleando las tablas de propiedades termodinámicas se obtuvieron los demás parámetros:

$$P_2 = P_3 = 2 \text{ MPa}$$

$$T_3 = T_2 = 212.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x_3 = 1$$

$$h_3 = 2798.30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_3 = 6.3390 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Estado 9: En este estado se encuentra la salida del absorbedor donde se extrae el líquido saturado para luego ser utilizado en la turbina de vapor, empleando las tablas de propiedades termodinámicas se obtuvieron los demás parámetros:

$$P_9 = P_2 = 2 \text{ MPa}$$

$$T_9 = T_2 = 212.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x_9 = 0$$

$$h_9 = 908.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_9 = 2.4467 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Calculando el valor de y' :

$$\dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}}$$

$$1 \times h_2 = y' \times h_3 + (1 - y') \times h_9$$

$$y' = \frac{h_2 - h_9}{h_3 - h_9} = \frac{1087.40 - 908.47}{2798.30 - 908.47} = 0.09468$$

Estado 10: En este estado se tiene la salida de la cámara flash 2, con una reducción de presión de 2 MPa a 1 MPa, donde la entalpía del estado 9 es igual a la del estado 10, obteniendo lo siguiente:

$$P_{10} = 1 \text{ MPa}$$

$$T_{10} = 179.88 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{10} = h_9 = 908.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{10f} = 762.51 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{10g} = 2777.10 \frac{kJ}{kg}$$

$$x_{10} = \frac{h_{10} - h_{10f}}{h_{10g} - h_{10f}} = \frac{(908.47 - 762.51) \frac{kJ}{kg}}{(2777.10 - 762.51) \frac{kJ}{kg}} = 0.07245$$

Estado 5: En este estado se tiene la salida del absorbedor 2, donde se extrae el vapor saturado a la presión de 1 MPa, obteniendo lo siguiente:

$$P_5 = P_{10} = 1 \text{ MPa}$$

$$T_5 = T_{10} = 179.88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x_5 = 1$$

$$h_5 = 2777.10 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_5 = 6.585 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Estado 11: En este estado se tiene la salida del absorbedor 2, donde se extrae el líquido saturado a la presión de 1 MPa, obteniendo lo siguiente:

$$P_{11} = P_{10} = 1 \text{ MPa}$$

$$T_{11} = T_{10} = 179.88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x_{11} = 1$$

$$h_{11} = 762.51 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_{11} = 2.1381 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Calculando el valor de y'' :

$$(1 - y') x h_{10} = y'' x h_5 + (1 - y' - y'') x h_{11}$$

$$y'' = \frac{h_{10} - y' x h_{10} - h_{11} + y' x h_{11}}{h_5 - h_{11}} = \frac{908.47 - 0.09468 x 908.47 - 762.51 + 0.09468 x 762.51}{2777.10 - 762.51}$$

$$y'' = 0.0656$$

Estado 4: En este estado se tiene la salida de la turbina de alta presión, donde el proceso es isoentrópico con una presión de 1 MPa, obteniendo lo siguiente:

$$P_4 = P_{10} = 1 \text{ MPa}$$

$$s_4 = s_3 = 6.3390 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Se tiene una mezcla bifásica, por lo tanto:

$$s_{4f} = 2.1381 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$s_{4g} = 6.585 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_{4f}}{s_{4g} - s_{4f}} = \frac{(6.3390 - 2.1381) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{(6.585 - 2.1381) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = 0.94468$$

$$h_{4f} = 762.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{4g} = 2777.10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = h_{4f} + x_4 (h_{4g} - h_{4f}) = 762.51 + 0.94468 (2777.10 - 762.51) = 2665.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Estado 6: Calculando la entalpía y entropía en el estado 6:

$$P_6 = 1 \text{ MPa}$$

$$h_6 = \frac{y'' x h_5 + y' x h_4}{y' + y''} = \frac{0.0656 x 2777.10 + 0.09468 x 2665.65}{0.0656 + 0.09468} = 2711.26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s_6 = \frac{y'' x s_5 + y' x s_4}{y' + y''} = \frac{0.0656 x 6.585 + 0.09468 x 6.3390}{0.0656 + 0.09468} = 6.43968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Estado 7: Se tiene la salida de la turbina de baja presión, con una presión de salida de 100 kPa, trabajando isoentrópicamente, empleando las tablas termodinámicas y realizando interpolaciones se obtuvo lo siguiente:

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

$$s_7 = s_6 = 6.43968 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$s_{7f} = 1.3028 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$s_{7g} = 7.3589 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$x_7 = \frac{s_7 - s_{7f}}{s_{7g} - s_{7f}} = \frac{(6.43968 - 1.3028) \frac{kJ}{kg \cdot K}}{(7.3589 - 1.3028) \frac{kJ}{kg \cdot K}} = 0.8482$$

$$h_{7f} = 417.51 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{7g} = 2675.00 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_7 = h_{7f} + x_7 (h_{7g} - h_{7f}) = 417.51 + 0.8482 (2675.00 - 417.51) = 2332.31 \frac{kJ}{kg}$$

Estado 8: Se tiene la salida del condensador, con una presión de salida de 100 kPa, donde se tiene líquido saturado, empleando las tablas termodinámicas se obtuvo lo siguiente:

$$P_8 = P_7 = 100 \text{ kPa}$$

$$x_8 = 0$$

$$h_8 = 417.51 \frac{kJ}{kg}$$

Los trabajos específicos de las turbinas son:

$$w_{tap} = y' (h_3 - h_4) = 0.09468 (2798.30 - 2665.65) \frac{kJ}{kg} = 12.559 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{tbp} = (y' + y'')(h_6 - h_7) = (0.09468 + 0.0656)(2711.26 - 2332.31) = 60.738 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo neto es:

$$w_{neto} = w_{tap} + w_{tbp} = (12.559 + 60.738) \frac{kJ}{kg} = 73.297 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora, se empleó las eficiencias isoentrópicas para las turbinas, por lo tanto, se

tuvo que:

$$\eta_t = 90\% = 0.9$$

$$w_{r,tap} = \eta_t \times w_{tap} = 0.9 \times 12.559 \frac{kJ}{kg} = 11.303 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{r,tbp} = \eta_t \times w_{tbp} = 0.9 \times 60.738 = 54.664 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo neto real:

$$w_{r,neto} = w_{r,tap} + w_{r,tbp} = (11.303 + 54.664) \frac{kJ}{kg} = 65.967 \frac{kJ}{kg}$$

La eficiencia térmica real es:

$$\eta_{t\acute{e}rmica\ cdbf} = \frac{w_{r,neto}}{h_1 - h_0} = \frac{65.967 \frac{kJ}{kg}}{(1\ 087.40 - 62.982) \frac{kJ}{kg}} = 0.0644 \times 100\% = 6.44\%$$

Selección del ciclo termodinámico

Las eficiencias térmicas reales de los ciclos son:

Tabla 10. Resumen de eficiencias térmicas reales.

Descripción	Eficiencia térmica real
Ciclo Orgánico Rankine	27.38%
Ciclo Binario Modificado con separación flash	19.894%
Ciclo Binario doble Flash	6.44%

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 10 se puede concluir que el mejor ciclo termodinámico es el Ciclo Orgánico Rankine porque se obtuvo una eficiencia térmica real de 27.38%. Con ello, se procedió con el desarrollo del siguiente objetivo.

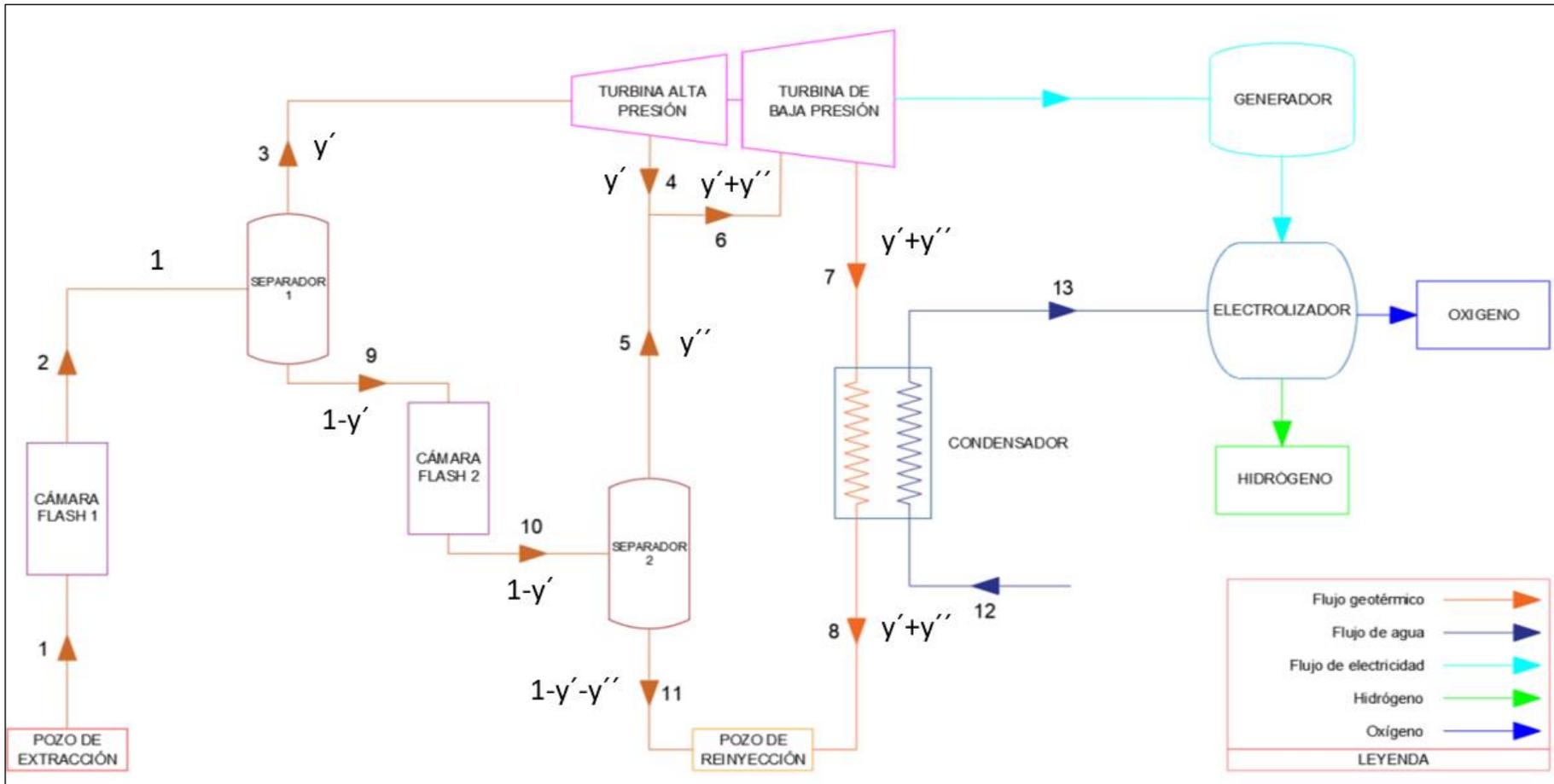


Figura 16. Esquema del ciclo binario doble flash y flujos de masa.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Generación de hidrógeno

La producción de energía para la central geotérmica en el campo geotérmico Chivay-Pinchollo se calcula empleando la potencia que posee la central, además del tiempo de operación menos los días de mantenimiento anuales considerados.

Entonces se calcula de la siguiente manera:

$$Potencia = 150 MW \approx 150\,000 kW$$

$$tiempo\ de\ operación = (365 - 5)\ días \times \frac{24\ h}{1\ día} = 8\,640\ h$$

Considerando un factor de planta de 95% (Trujillo y Pérez, 2022), se obtiene una generación de energía total por año de:

$$E_{generada} = f_p \times Potencia \times tiempo\ de\ operación$$

$$E_{generada} = 0.95 \times 150\,000\ kW \times 8\,640\ h = 1\,231\,200\,000\ kWh$$

Ahora, de acuerdo con AlZohbi *et al.* (2023), se necesitan aproximadamente 60 kWh para generar 1 kg de hidrógeno verde, por lo tanto, se obtuvo lo siguiente:

$$H_{gen} = \frac{1\ kg\ H_2}{60\ kWh} \times 1\,231\,200\,000\ kWh = 20\,520\,000\ kg\ H_2$$

Por lo tanto, se puede generar 20 520 toneladas de hidrógeno verde.

Ahora, la cantidad de oxígeno generado se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$O_{gen} = 20\,520\,000\ kg\ H_2 \times \frac{0.032\ kg\ O_2}{0.004\ kg\ H_2} = 164\,160\,000\ kg\ O_2$$

Se generan 164 160 000 kg de oxígeno.

Dichos datos sirvieron para realizar el análisis de rentabilidad para determinar los indicadores económicos.

4.4. Selección de equipamiento

El ciclo termodinámico seleccionado es el Ciclo Orgánico Rankine por tener la máxima eficiencia térmica, donde para seleccionar el equipamiento se procedió de la siguiente manera:

Turbina de vapor

La turbina debe generar 150 MW de potencia, por lo que, se seleccionó una turbina

Siemens SST-600 con una capacidad de 150 MW, su ficha técnica se puede apreciar en el Anexo 6.

Bomba de extracción

La bomba debe tener la potencia necesaria para extraer el fluido geotérmico de los pozos de extracción, la cual debe ser:

$$P_{bomba} = \dot{m}_{fg} \times w_{b,r}$$

$$P_{bomba} = 1\,451.55 \frac{kg}{s} \times 3.578 \frac{kJ}{kg} = 5\,193.65 \text{ kW} = 6\,962 \text{ hp}$$

La bomba debe tener una potencia de 5 193.65 kW o equivalente a 6 962 hp. La bomba seleccionada es una sumergible SULZER PUMPS modelo SJT 20DLC, con una potencia de 1 748 kW por bomba, por lo que son necesarias 3 bombas, en el Anexo 7 se tiene su ficha técnica.

Intercambiador de calor

El intercambiador de calor debe tener una capacidad de 5 486 m³/h, de acuerdo con el análisis se seleccionó un Alfa Laval CP120. En el Anexo 8 se puede apreciar la ficha técnica.

Electrolizador

Dicho equipo debe tener una capacidad de 150 MW, por lo que, se seleccionaron 6 electrolizadores HyLYZER - 5.000 - 30 de 25 MW cada uno, en el Anexo 9 se puede verificar los datos técnicos del mismo.

Condensador

El condensador es un intercambiador de calor y debe tener una capacidad de 5 486 m³/h, de acuerdo con el análisis se seleccionó un Alfa Laval CP120. En el Anexo 8 se puede apreciar la ficha técnica.

Generador

El generador se selecciona en consideración con la potencia a generar por la turbina, y el factor de potencia que es de 0.85 para calcular la potencia aparente:

$$P_{generador} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\cos \varphi}$$

$$P_{\text{generador}} = \frac{150 \text{ MW}}{0.85} = 176.47 \text{ MVA}$$

La potencia aparente del generador debe ser de 176.47 MVA como mínimo, pero cabe precisar que no se debe sobrecargar, por lo que se sobredimensiona para que trabaje al 90% con el fin de que cumpla con la vida útil estipulada por el fabricante. Entonces:

$$P_{\text{generador real}} = \frac{P_{\text{generador}}}{0.90}$$

$$S_{\text{generador real}} = \frac{176.47 \text{ MVA}}{0.90} = 196.08 \text{ MVA}$$

Se debe seleccionar un generador con una potencia aparente de 200 MVA, por lo que se seleccionó un generador Siemens SGen6-100A-2P de 200 MVA, en el Anexo 10 se puede observar su ficha técnica.

Tuberías

Ahora, se calcula el diámetro para las tuberías del pozo de extracción:

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

$$N_{\text{pozos extracción}} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_{\text{unitario pozo extracción}}}$$

$$N_{\text{pozos extracción}} = \frac{1\,451.55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{200 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} = 7.26$$

$$N_{\text{pozos extracción}} = 8$$

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

$$\dot{m}_{\text{unitario pozo extracción}} = \frac{\dot{m}_g}{N_{\text{pozos extracción}}} = \frac{1\,451.55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{8}$$

$$\dot{m}_{\text{unitario pozo extracción}} = 181.44 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h = 1\,250 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad P_c = 40 \text{ bar}$$

$$k = 183900$$

Utilizando la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{geotérmico unitario}} \cdot h^{1.102}}{k \cdot \pi \cdot P_c^{0.96}}} = 0.307 \text{ m} \cong 12.081 \text{ pulgadas}$$

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 11.

4.5. Indicadores de rentabilidad

El presupuesto necesario para llevar a cabo la implementación de la central geotermoeléctrica de 150 MW para la producción de hidrógeno se detalla en la Tabla 11.

Tabla 11. Presupuesto de central geotérmica para generar hidrógeno verde.

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Turbina de vapor de 150 MW	1 und	S/. 300 000 000.00	S/. 300 000 000.00
Generador de 200 MVA	1 und	S/. 300 000 000.00	S/. 300 000 000.00
Bomba para pozo de 1.748 MW	3 und	S/. 7 000 000.00	S/. 21 000 000.00
Intercambiador de calor	1 und	S/. 12 000 000.00	S/. 12 000 000.00
Condensador	1 und	S/. 12 000 000.00	S/. 12 000 000.00
Electrolizador de 25 MW	6 und	S/. 85 000 000.00	S/. 510 000 000.00
Tanque para almacenar hidrógeno	1 und	S/. 30 000 000.00	S/. 30 000 000.00
Tanque para almacenar oxígeno	1 und	S/. 30 000 000.00	S/. 30 000 000.00
Accesorios red de tuberías	1 glb	S/. 20 000 000.00	S/. 20 000 000.00
Red de tuberías	1 glb	S/. 70 000 000.00	S/. 70 000 000.00
Infraestructura	1 glb	S/. 50 000 000.00	S/. 50 000 000.00
Accesorios para equipamiento	1 glb	S/. 20 000 000.00	S/. 20 000 000.00
Total (sin IGV)			S/. 1 375 000 000.00
IGV (18%)			S/. 247 500 000.00
Total (con IGV)			S/. 1 622 500 000.00
Imprevistos (10%)			S/. 162 250 000.00
Presupuesto total para la central geotermoeléctrica			S/. 1 784 750 000.00

Fuente: Elaboración propia.

El presupuesto de implementación de la central geotermoeléctrica asciende a la suma de S/. 1 784 750 000.00, incluyendo equipamiento, materiales, insumos e infraestructura, además del IGV e imprevistos.

Selección de vida útil de la central geotérmica

Se ha considerado una vida útil de 20 años para la central geotermoeléctrica, en

consideración con la Tabla 12, el tiempo u horizonte para evaluar el proyecto es de 20 años, siendo un futuro medio, ya que los equipos más importantes poseen una vida útil mayor a 20 años, además de que la Ley de Concesiones Eléctricas del Perú, en el art. 21 menciona que la vida útil para proyectos de concesión eléctrica es ilimitado, por lo tanto, la vida del proyecto es de 20 años.

Tabla 12. Horizonte de evaluación para inversiones.

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

Fuente: (Castillo y Zhangallimbay, 2021).

Ahorro por concepto de energía

Para determinar el ahorro de energía, se debe conocer el costo de la energía en la ubicación de la central geotérmica, entonces, considerando la subestación Callalli y que opera 360 días y 5 días al año se dan los mantenimientos. La potencia que genera la central es de 150 MW, empleando un factor de planta de 0.95, y teniendo en consideración que trabaja 19 horas fuera de punta y 5 horas en punta, se tiene una producción de energía de 974 700 000 kWh en horas fuera de punta y de 256 500 000 kWh en horas punta, con un costo de S/. 0.2312 por kWh para fuera de punta y de S/. 0.2381 por kWh para hora punta, y de S/. 22.14 por kW-mes. Entonces, resumiendo dicha información en la Tabla 13:

Tabla 13. Ahorro en energía generada y potencia.

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total (S/.)
Energía en HP	256 500 000 kWh	S/. 0.2381 / kWh	S/. 61 072 650.00
Energía en HFP	974 700 000 kWh	S/. 0.2312 / kWh	S/. 225 350 640.00
Potencia anual	1 710 000 kW	S/. 22.14 / kW-mes	S/. 37 859 400.00
Total			S/. 324 282 690.00

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, se tiene un ahorro por concepto de energía generada y potencia al año de S/. 324 282 690.00, tanto para horas punta y fuera de punta.

Venta de hidrógeno generado

El hidrógeno generado anualmente es de 20 520 000 kg, donde su costo nivelado de acuerdo con H2 Perú (2021) es de S/. 8.11 por kg hasta el 2040 y de S/. 5.93

por kg desde el 2041 hasta el 2050. Con dichos datos se elaboró la Tabla 14:

Tabla 14. Venta de hidrógeno período 2024 – 2043.

Año	Precio (S/. / kg)	Producción (kg)	Costo total (S/.)
2024	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2025	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2026	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2027	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2028	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2029	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2030	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2031	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2032	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2033	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2034	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2035	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2036	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2037	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2038	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2039	S/. 8.11	20 520 000.00	S/. 166 417 200.00
2040	S/. 5.93	20 520 000.00	S/. 121 683 600.00
2041	S/. 5.93	20 520 000.00	S/. 121 683 600.00
2042	S/. 5.93	20 520 000.00	S/. 121 683 600.00
2043	S/. 5.93	20 520 000.00	S/. 121 683 600.00

Fuente: Elaboración propia.

Venta de oxígeno generado

El oxígeno generado es de 164 160 000.00 kg al año, y se ha considerado un precio de venta de S/. 2.50 por kg, entonces se procedió a elaborar la Tabla 15:

Tabla 15. Venta de oxígeno período 2024 – 2043.

Año	Producción (kg)	Precio (S/. / kg)	Costo total (S/.)
2024	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2025	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2026	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2027	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2028	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2029	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2030	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2031	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2032	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2033	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2034	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2035	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2036	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2037	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2038	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2039	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2040	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2041	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2042	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00
2043	164 160 000.00	S/. 2.50	S/. 410 400 000.00

Fuente: Elaboración propia.

Criterios para análisis de rentabilidad

Para el análisis de rentabilidad se consideró los datos que muestra la Tabla 16:

Tabla 16. Perspectiva de inflación para el 2022 al 2023.

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

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

Fuente: (BCRP, 2022).

La inflación que se ha tomado en el presente trabajo es del 4% para las sociedades no financieras y se mantiene en el tiempo a partir de 2024.

Análisis de rentabilidad

Una vez determinado todos los ingresos y egresos de la central geotérmica para generar hidrógeno, se procedió a elaborar la Tabla 17, donde se detalla el tiempo de análisis, que va desde el 2024 hasta el 2043, considerando la inversión inicial de S/. 1 784 750 000.00, un costo de operación y mantenimiento (O y M) de aproximadamente el 20% de la inversión (incluye pagos a trabajadores, seguros, indemnizaciones, operación, mantenimientos, entre otros), un costo de permisos de S/. 1 000 000.00, un ahorro de energía de S/. 324 282 690.00 anualmente, venta de hidrógeno generado de S/. 166 417 200.00 para los años 2024 al 2039 y de S/. 121 683 600.00 para los años 2040 al 2043, venta de oxígeno de S/. 410 400 000.00 anualmente.

Tabla 17. Análisis de indicadores de rentabilidad.

Año	Inversión	O y M	Permisos	Ahorro de energía	Venta de hidrógeno	Venta de oxígeno	Ingreso Bruto	Impuesto a la Renta	Ingreso Neto	Ingreso Neto Actualizado
2023	-S/. 1,784,750,000.00								-S/. 1,784,750,000.00	-S/. 1,784,750,000.00
2024		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 365,581,656.73	S/. 335,396,015.35
2025		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 351,520,823.78	S/. 295,868,044.59
2026		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 338,000,792.10	S/. 260,998,627.90
2027		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 325,000,761.63	S/. 230,238,733.15
2028		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 312,500,732.34	S/. 203,104,034.19
2029		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 300,481,473.40	S/. 179,167,284.92
2030		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 288,924,493.65	S/. 158,051,592.20
2031		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 277,812,013.13	S/. 139,424,481.48
2032		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 267,126,935.70	S/. 122,992,661.85
2033		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 256,852,822.79	S/. 108,497,408.13
2034		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 246,973,868.07	S/. 95,710,487.06
2035		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 237,474,873.14	S/. 84,430,563.74
2036		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 228,341,224.17	S/. 74,480,031.53
2037		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 219,558,869.40	S/. 65,702,215.53
2038		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 211,114,297.50	S/. 57,958,905.73
2039		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 166,417,200.00	S/. 410,400,000.00	S/. 543,149,890.00	S/. 162,944,967.00	S/. 202,994,516.83	S/. 51,128,180.78
2040		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 121,683,600.00	S/. 410,400,000.00	S/. 498,416,290.00	S/. 149,524,887.00	S/. 179,111,512.01	S/. 41,387,866.07
2041		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 121,683,600.00	S/. 410,400,000.00	S/. 498,416,290.00	S/. 149,524,887.00	S/. 172,222,607.70	S/. 36,510,114.74
2042		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 121,683,600.00	S/. 410,400,000.00	S/. 498,416,290.00	S/. 149,524,887.00	S/. 165,598,661.25	S/. 32,207,228.96
2043		S/. 356,950,000.00	S/. 1,000,000.00	S/. 324,282,690.00	S/. 121,683,600.00	S/. 410,400,000.00	S/. 498,416,290.00	S/. 149,524,887.00	S/. 159,229,481.97	S/. 28,411,458.15

Nota: Considerando una inflación anual del 4% y una tasa de interés de 9% anual. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Indicadores para análisis de rentabilidad.

Ingreso total neto	S/. 2,601,665,936.06
VAN	S/. 816,915,936.06
Inflación anual	4%
Tasa de interés anual	9%
Vida útil del proyecto	20 años

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber realizado el análisis de rentabilidad, que se detalla en la Tabla 17, se procedió a determinar los indicadores como son el VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Retorno), tiempo de recuperación de la inversión inicial, considerando una inflación del 4% anual y una tasa de interés de 9% anual, obteniéndose la Tabla 19:

Tabla 19. Indicadores de rentabilidad.

Inversión	- S/. 1 784 750 000.00
Ingreso total neto actualizado	S/. 2 601 665 936.06
VAN	S/. 816 915 936.06
TIR	16.12%
Tiempo de recuperación de inversión	8 años

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis se puede decir que el ingreso total neto actualizado luego del análisis de rentabilidad fue de S/. 2 601 665 936.06, con un Valor Actual Neto de S/. 816 915 936.06, una Tasa Interna de Retorno de 16.12% y un tiempo de retorno de la inversión inicial de 8 años.

Costo nivelado del hidrógeno verde (LCOH)

Considerando la fórmula para calcular el costo nivelado del hidrógeno verde generado (LCOH), se obtuvo lo siguiente:

$$LCOH = \frac{I_t + \sum_{t=1}^n \frac{O y M + F}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{H_t}{(1+r)^t}}$$

Dónde:

I_t : Inversión inicial o año "0".

O y M: Gastos en operación y mantenimiento.

F: Ahorro de energía eléctrica (se resta).

r: Tasa de descuento.

t: Vida útil del proyecto.

H_t : Hidrógeno verde generado.

Entonces, de acuerdo con la información obtenida, se obtuvo lo siguiente:

$$I_t = S/.1\ 784\ 750\ 000.00$$

Los gastos de operación y mantenimiento representan alrededor del 20% de la inversión total, entonces:

$$O\ y\ M = S/.356\ 950\ 000.00$$

La tasa de descuento para proyectos de inversión se considera en 9%, de acuerdo con la Tabla 20, la cual se consideró para el análisis económico del proyecto, entonces se tuvo:

$$r = 9\%$$

La vida útil del proyecto se consideró en 20 años, de acuerdo con la Ley de Concesiones Eléctricas del Perú, donde indica en el Artículo 21°, que el tiempo para una concesión eléctrica es indefinido, es por ello que se ha considerado una vida útil de 20 años.

$$t = 20\ años$$

El hidrógeno verde generado se mantiene constante durante la vida útil del proyecto, siendo de:

$$H_t = 20\ 520\ 000\ \frac{kg}{año}$$

El ahorro generado por la utilización de la energía eléctrica producida por la central geotérmica se mantiene constante durante la vida útil del proyecto, siendo de:

$$F = S/.324\ 282\ 690.00$$

Por lo tanto, resumiendo la información en la Tabla 21.

Entonces, reemplazando los datos en la fórmula del LCOE, se obtuvo lo siguiente:

$$LCOH = \frac{S/.1\ 784\ 7500\ 000.00 + S/.3\ 258\ 434\ 376.58 - S/.2\ 960\ 229\ 345.36}{187\ 317\ 757.10\ kg}$$

$$LCOE = \frac{S/.11.12}{kg\ H_2}$$

Esto quiere decir que se gastan S/. 11.12 por cada kg de hidrógeno verde generado en la central geotérmica. Siendo alto, y esto se debe al costo en sí de los componentes y la tecnología, que aún es algo prematura y para que sus costos bajen, se debe seguir mejorando cada día. Y para que el proyecto sea rentable, se

debe vender por encima de dicho costo de producción. Cabe precisar que la venta de oxígeno ayuda a mejorar notablemente los indicadores de rentabilidad de la central geotérmica, ya que, si solo se vende hidrógeno verde al costo nivelado estimado, no se tendrían ganancias.

Tabla 20. Tasas de descuento para diferentes países.

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

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

Fuente: (Castillo y Zhangallimbay, 2021)

Tabla 21. Resumen de información para calcular LCOE

Año	Inversión	O y M	O y M corregido	H ₂ generado (kg/año)	H ₂ generado corregido (kg/año)	Ahorro de energía	Ahorro de energía corregido
0	S/ 1 784 750 000.00						
1		S/ 356 950 000.00	S/ 327,477,064.22	20 520 000	18 825 688.07	S/ 324,282,690.00	S/ 297,507,055.05
2		S/ 356 950 000.00	S/ 300,437,673.60	20 520 000	17 271 273.46	S/ 324,282,690.00	S/ 272,942,252.34
3		S/ 356 950 000.00	S/ 275,630,893.21	20 520 000	15 845 205.01	S/ 324,282,690.00	S/ 250,405,736.09
4		S/ 356 950 000.00	S/ 252,872,379.09	20 520 000	14 536 885.33	S/ 324,282,690.00	S/ 229,730,033.11
5		S/ 356 950 000.00	S/ 231,993,008.34	20 520 000	13 336 592.05	S/ 324,282,690.00	S/ 210,761,498.26
6		S/ 356 950 000.00	S/ 212,837,622.33	20 520 000	12 235 405.55	S/ 324,282,690.00	S/ 193,359,172.72
7		S/ 356 950 000.00	S/ 195,263,873.70	20 520 000	11 225 142.7	S/ 324,282,690.00	S/ 177,393,736.44
8		S/ 356 950 000.00	S/ 179,141,168.53	20 520 000	10 298 96.06	S/ 324,282,690.00	S/ 162,746,547.19
9		S/ 356 950 000.00	S/ 164,349,695.90	20 520 000	9 447 978.036	S/ 324,282,690.00	S/ 149,308,758.89
10		S/ 356 950 000.00	S/ 150,779,537.52	20 520 000	8 667 869.757	S/ 324,282,690.00	S/ 136,980,512.75
11		S/ 356 950 000.00	S/ 138,329,850.94	20 520 000	7 952 174.089	S/ 324,282,690.00	S/ 125,670,195.18
12		S/ 356 950 000.00	S/ 126,908,120.13	20 520 000	7 295 572.559	S/ 324,282,690.00	S/ 115,293,757.05
13		S/ 356 950 000.00	S/ 116,429,468.01	20 520 000	6 693 185.834	S/ 324,282,690.00	S/ 105,774,089.03
14		S/ 356 950 000.00	S/ 106,816,025.69	20 520 000	6 140 537.462	S/ 324,282,690.00	S/ 97,040,448.65
15		S/ 356 950 000.00	S/ 97,996,353.85	20 520 000	5 633 520.608	S/ 324,282,690.00	S/ 89,027,934.54
16		S/ 356 950 000.00	S/ 89,904,911.79	20 520 000	5 168 367.53	S/ 324,282,690.00	S/ 81,677,004.17
17		S/ 356 950 000.00	S/ 82,481,570.45	20 520 000	4 741 621.587	S/ 324,282,690.00	S/ 74,933,031.35
18		S/ 356 950 000.00	S/ 75,671,165.55	20 520 000	4 350 111.548	S/ 324,282,690.00	S/ 68,745,900.32
19		S/ 356 950 000.00	S/ 69,423,087.66	20 520 000	3 990 928.026	S/ 324,282,690.00	S/ 63,069,633.32
20		S/ 356 950 000.00	S/ 63,690,906.11	20 520 000	3 661 401.858	S/ 324,282,690.00	S/ 57,862,048.92
			S/ 3,258,434,376.58		187 317 757.1		S/ 2,960,229,345.36

Fuente: Elaboración propia.

V. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación, se obtuvo que el ciclo Orgánico Rankine fue el mejor ciclo termodinámico a emplear para generar hidrógeno verde, con una eficiencia térmica de 27.38%, siendo la más alta eficiencia obtenida entre los 3 ciclos analizados.

La potencia a generar fue de 150 MW, con una producción de energía de 1 231 200 MWh anual, empleándose un factor de planta de 0.95, operando durante todo el año, con 5 días de mantenimiento al año, y que por cada 60 kWh generado se logra producir 1 kg de hidrógeno verde mediante el uso de un electrolizador, obteniendo un total de 20 520 toneladas al año, con una producción de oxígeno de 164 160 toneladas anuales.

Ahora, el equipamiento necesario para poder optimizar el ciclo termodinámico seleccionado, se empleó una turbina Siemens SST-600 de 150 MW, 3 bombas SULZER PUMPS SJT 20DLC de 1 748 kW cada una, un intercambiador de calor Alfa Laval CP120, con 6 electrolizadores HyLYZER de 25 MW cada uno, un condensador Alfa Laval CP120, un generador Siemens SGen6-100A-2P de 200 MVA, con sus tuberías SCH-80 de 14 pulgadas de diámetro.

Luego, del análisis de rentabilidad, se obtuvo un presupuesto de S/. 1 784 750 000.00, con un LCOH de S/. 11.12 por kg de hidrógeno verde, pero que al venderse a S/. 8.11 por kg desde 2024 a 2039 y S/. 5.93 por kg en adelante, con un costo del oxígeno de S/. 2.50 por kg, se logró obtener un VAN de S/. 816 915 936.06, TIR de 16.12% y un tiempo de retorno de inversión de 8 años.

Donde los resultados concuerdan con Ali *et al.* (2023), ya que emplearon un ciclo termodinámico de vapor, es decir, Rankine regenerativo, además de un ciclo de absorción de doble efecto con desalación double flash, siendo un sistema multigeneración. La eficiencia que encontraron es similar a la eficiencia encontrada en el ciclo Orgánico Rankine empleado en la presente investigación, y esto se debe a que se emplearon ciclos similares, aunque es algo más baja y puede deberse a los parámetros empleados además de la potencia que generaron, que fue de 103 MW. Ello demostró la importancia de emplear un ciclo orgánico Rankine, debido a

que posee la más alta eficiencia frente a los demás ciclos termodinámicos.

Con respecto a los resultados obtenidos por Awaleh *et al.* (2022), que realizaron un estudio comparativo sobre la factibilidad económica para la producción de hidrógeno verde mediante el uso de electrólisis del agua con energía geotérmica y eólica, pero el enfoque es en la energía geotérmica, donde lograron obtener que el costo de generar electricidad con energía geotérmica fue de \$ 0.042 por kWh, y el LCOH del hidrógeno verde fue de entre \$ 3.31 y \$4.78 por kg, un valor algo cercano al obtenido en la presente investigación que fue de \$2.78 por kg, y esto puede deberse a la inflación, tipo de moneda, políticas, entre otros factores, ya que cada país maneja de forma independiente su economía de otros países, donde un producto puede costar menos en uno pero más en otro.

Por lo tanto, los costos de generar hidrógeno verde son similares, aunque aún son elevados lo que origina que todavía no sea rentable su producción excepto que se obtenga otro producto derivado que permita incrementar las ganancias.

Ahora, con relación a Mukhtar *et al.* (2022), los resultados difieren bastante, esto significa que lograron generar 1.515 L/s de hidrógeno verde frente a los 0.66 L/s generados en la presente investigación, y puede deberse a la cantidad de energía empleada para generar cada kg de hidrógeno, y ello tiene relación con el electrolizador empleado, siendo un electrolizador más eficiente en relación al seleccionado.

De igual modo, emplearon un ciclo Orgánico Rankine para generar energía eléctrica que posteriormente fue utilizada para generador hidrógeno verde al emplear la energía generada en un electrolizador para separar las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno.

Con respecto a Assareh *et al.* (2022), quienes emplearon de igual modo energía geotérmica para generar hidrógeno verde, obteniendo una producción de 352 816 kWh y 174.913 kg de hidrógeno verde al año.

Dichos datos son menores a los obtenidos en la presente investigación, y esto se debe a que la producción de energía es mucho menor y por ende la generación de

hidrógeno verde, y ello demuestra la importancia de emplear energías renovables como la geotérmica para generar hidrógeno verde y así mitigar el impacto ambiental, además de aumentar la matriz energética de la nación donde se emplea.

De los resultados determinaron que con el sistema geotérmico obtenían una mejor eficiencia que empleando energía solar, aumentando en 11.21% la producción de hidrógeno y en un 0.17% la eficiencia exergética.

Ello demostró la importancia de emplear la energía geotérmica para la generación de hidrógeno verde mediante el uso de un ciclo termodinámico Orgánico Rankine, el cual brinda una de las mejores eficiencias térmicas, energéticas y exergéticas.

En consideración con Barasa y Akanni (2022), quienes también analizaron el uso de la energía geotérmica en cabeza de pozo para producir energía eléctrica para ser inyectada a la red. Lograron demostrar que las centrales geotérmicas permiten complementar y sustituir a las plantas eléctricas convencionales, con una excelente eficiencia, y grandes beneficios medioambientales. Además, agregaron que las centrales geotérmicas en boca de pozo ofrecen mejores indicadores respecto a la eficiencia y rendimiento, como un excelente factor de capacidad, factor de carga, disponibilidad, costo unitario de producción de energía, entre otros. Con ello, lograron darle la importancia deseada al uso de dicha energía renovable, debido a sus excelentes prestaciones y características.

Tomando en cuenta a Kjeld *et al.* (2022), quienes realizaron su investigación para analizar el ciclo de vida de una central geotérmica en Islandia. Donde determinaron que las centrales geotérmicas brindan excelentes ciclos de vida, no solo técnica y ambiental, también económicamente, ya que, al largo plazo, es una energía renovable que no contamina, evitando la generación de millones de toneladas de dióxido de carbono al año, y en el ámbito económico, aunque es algo elevado su costo inicial, la recuperación de la inversión se da en el corto y mediano plazo en el ciclo de vida.

En contraste con Ghazvini *et al.* (2019), donde realizaron en su investigación un análisis sobre emplear energía geotérmica para generar hidrógeno verde, elaborada en Irán. Lograron determinar que usar energía geotérmica para producir

hidrógeno verde es mucho más amigable con el medio ambiente, ya que es una fuente energética renovable en comparación con emplear combustibles fósiles. Adicionalmente, lograron calcular que el costo de producir hidrógeno verde con energía geotérmica mediante electrólisis era mucho más competitivo y bajo con relación a otro tipo de fuentes energéticas renovables como eólica, solar, solar térmica, gas natural, fotovoltaica, y de la misma red.

Finalmente, considerando a Qurrahman *et al.* (2021), quienes efectuaron un análisis termodinámico de una central geotérmica en Dieng, realizando un análisis de energía y exergía. Para dicho análisis emplearon tablas termodinámicas, donde comienzan calculando la entalpía y entropía tanto en la entrada como salida de los datos de temperatura compilados, tal cual se ha realizado en el actual estudio, aunque también se empleó software termodinámico para comparar si los resultados obtenidos fueron correctos, donde se logró demostrar que el cálculo efectuado era correcto y la diferencia de los parámetros obtenidos era insignificante.

VI. CONCLUSIONES

- Los ciclos empleados para el análisis fueron el Ciclo Rankine Orgánico, Ciclo Binario Modificado con separación Flash y Ciclo Binario Doble Flash. El campo geotérmico Chivay-Pinchollo posee una altitud de 3 551 msnm, equivalente a una presión atmosférica de 65.311 kPa, con una potencia posible de desarrollo de 150 MWe.
- Del análisis de los ciclos de potencia estudiados, se obtuvo una eficiencia térmica real del ciclo Orgánico Rankine de 27.38%, para el Ciclo Binario Modificado con separación Flash fue de 19.894% y para el ciclo Binario Doble Flash fue de 6.44%. De acuerdo a dichos resultados el que ofrece la mejor eficiencia térmica real es el Ciclo Orgánico Rankine, siendo el seleccionado para continuar con el análisis respectivo.
- La energía generada es de 1 231 200 MWh, considerando un factor de planta de 0.95, trabajando todo el año menos 5 días de mantenimiento, y que es necesario usar 60 kWh por cada kg de hidrógeno verde generado, se obtuvo 20 520 toneladas de hidrógeno verde al año y de oxígeno se generaron 164 160 toneladas al año.
- El equipamiento necesario para la central geotermoeléctrica fue una turbina de vapor Siemens SST-600 de 150 MW, tres bombas SULZER PUMPS modelo SJT 20DLC de 1 748 kW cada una, un intercambiador de calor Alfa Laval CP120, seis electrolizadores HyLYZER – 5.000 – 30 de 25 MW cada uno, un condensador Alfa Laval CP120, un generador Siemens SGen6-100A-2P de 200 MVA y tuberías SCH-80 de 14 pulgadas de diámetro
- Del análisis de rentabilidad se obtuvo un ingreso total neto actualizado de S/. 2 601 665 936.06, con un Valor Actual Neto de S/. 816 915 936.06, una Tasa Interna de Retorno de 16.12% y un tiempo de retorno de la inversión inicial de 8 años. Determinando que es factible técnica y económicamente el diseño de una central geotermoeléctrica en el campo geotérmico Chivay-Pinchollo para generar hidrógeno verde.

VII. RECOMENDACIONES

- Entre los parámetros para el ciclo termodinámico empleado, se pueden variar, aunque cabe precisar, que para optimizar el ciclo se pueden emplear otras metodologías o técnicas existentes en la literatura, como Cengel et al. (2019), Borgnakke y Sonntag (2019), ya que son bibliografías actuales de última edición, que contienen los temas detallados sobre el análisis termodinámico de los distintos ciclos empleados en centrales térmicas, sirviendo de gran ayuda porque además contienen las tablas de propiedades termodinámicas actualizadas
- La eficiencia térmica puede mejorar dependiendo de la configuración seleccionada, esto significa que se puede variar dicha configuración para el ciclo termodinámico. Precisando, que mientras más extensa la configuración es más tedioso el análisis y la eficiencia térmica mejora de forma notable, pero hasta cierto nivel de configuración, es decir, si se aumenta recalentamiento con regeneración donde se emplean calentadores abiertos o cerrados, solo se pueden emplear hasta un cierto límite, ya que luego la eficiencia no aumenta notablemente y es impráctico además de costoso.

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.

Disponible en: <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12048567.pdf>.

AKHTARI, M., SHAYEGH, I., and KARIMI, N. (2019). Tecno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable earth - air heat exchanger coupled with electric boiler, hydrogen, wind and PV configurations. *Renewable Energy*, 10(169), 1-54.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.169>.

AL ENAZI, A., et al. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962-1985.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.03.036>.

ALFARO, C., et al. (2021). Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96, 1-13.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102169>.

ALI HAIDER, S. M., et al. (2023). Energy and Exergy Analysis of a Geothermal Sourced Multigeneration System for Sustainable City. *Energies*, 16(1616), 1-19.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en16041616>.

ALIRAHMI, S. M., et al. (2021). Green hydrogen and electricity production via geothermal-driven multi-generation system: Thermodynamic modeling and optimization. *Fuel*, 308(122049).

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122049>.

ALVAREZ, A. (2020). Clasificación de las investigaciones. Repositorio de la Universidad de Lima, 1-5.

Disponible en: <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/10818>.

ALZOHBI, G., ALSHUHAIL, L., and ALMOAIKEL, A. (2023). An estimation of green

hydrogen generation from wind energy: A case study from KSA. *Energy Reports*, 9, 262-267.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.010>.

ASSAREH, E., et al. (2022). Optimization of geothermal and solar driven clean electricity and hydrogen production multi-generation systems to address the energy nexus. *Energy Nexus*, 5, 1-16.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100043>.

AWALEH, M. O., et al. (2022). Economic Feasibility of Green Hydrogen Production by Water Electrolysis Using Wind and Geothermal Energy Resources in Asal-Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti): A Comparative Evaluation. *Energies*, 15(138), 1-23.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en15010138>.

BALL, P. (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.

Disponible en: <https://doi.org/10.1115/1.4048187>.

BARASA, M., and AKANNI, O. (2022). Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review. *Energy Strategy Reviews*, 39, 1-27.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100735>.

BCRP. (2022). Reporte de inflación: Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2022-2023. Banco Central de Reserva del Perú (BCRP).

Disponible en: <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2023/junio/reporte-de-inflacion-junio-2023.pdf>.

BOONGALING, C., TALOSIG, K., & MEDRANO, E. (2022). Prospects and challenges for green hydrogen production and utilization in the Philippines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 17859-17870.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.101>

Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2019). *Fundamentals of Thermodynamics* (10ma ed.). Estados Unidos: Wiley.

BOSNJAKOVIC, M., STOJKOV, M., and JURJEVIC, M. (2019). Environmental Impact of Geothermal Power Plants. *Tehnicki vjesnik*, 26(5), 1515-1522.

Disponible en: <https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640>.

CASTILLO, J., a 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.

Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47285-la-tasa-social-descuento-la-evaluacion-proyectos-inversion-aplicacion-ecuador>.

CEGLIA, A., et al. (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.

Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/690/1/012051>.

CENGEL, Y., and BOLES, M. (2019). *Termodinámica*. Mc Graw Hill Educación.

CENGEL, Y., and CIMBALA, J. (2015). *Fluid Mechanis Fundamentals and Applications*. Mc Graw Hill.

CENGEL, Y., and GHAJAR, A. (2020). *Heat and Mass Transfer (6ta ed.)*. United States of America: Mc Graw Hill.

COLUCCI, V., et al. (2021). LCA and Exergo-Environmental Evaluation of a Combined Heat and Power Double-Flash Geothermal Power Plant. *Sustainability*, 13(4), 1-22.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13041935>.

FERNÁNDEZ, D. (2022). El hidrógeno como combustible del futuro. Repositorio de la Universidad Pontificia Comillas.

Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/508850/retrieve>.

FIASCHI, D., et al. (2021). A Comparison of Different Approaches for Assessing Energy Outputs of Combined Heat and Power Geothermal Plants. *Sustainability*, 13(4527), 1-13.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13084527>.

GASCO. (2023). *EL MUNDO DE LA ENERGÍA*. La energía se transforma:

Disponible en: <http://www.gascoeduca.cl/Contenido/Contenido.aspx?Cod=11>.

GHANI, A., et al. (2020). Geothermal based hybrid energy systems, toward eco-friendly energy approaches. *Renewable Energy*, 147, 2003-2012.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.140>.

GHAZVINI, M., et al. (2019). Geothermal energy use in hydrogen production: A review. *International Journal of Energy Research*, 1-29.

Disponible en: <https://doi.org/10.1002/er.4778>.

Gobierno de Navarra. (2020). Balance energético de Navarra. Gobierno de Navarra.

H2 Perú. (2021). Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú. Asociación Peruana de Hidrógeno - ENGIE Impact.

Disponible en: https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf.

HERNÁNDEZ, R., y MENDOZA, C. (2018). Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativamente, cualitativa y mixta. Mc Graw Hill Education.

Disponible en: <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612>.

HIDALGO, L., et al. (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.

Disponible en: <http://www.uajournals.com/campusvirtuales/journal/19/13.pdf>.

HOSSEIN, M., et al. (2018). Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science and Engineering*, 6, 340-361.

Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ese3.239>.

LI, J., et al. (2023). Life cycle sustainability assessment and circularity of geothermal power plants. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 141-156.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.027>.

MANZELLA, A., et al. (2018). Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, 72, 232-248.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.015>.

MARTY, F., et al. (2019). Exergy analysis and optimization of a combined heat and

power geothermal plant. *Energies*, 12(1175), 1-22.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en12061175>.

MATUSZEWSKA, D., KUTA, M., and 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.

Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012142>.

MEHTA, A., et al. (2019). Band gap tuning and surface modification of carbon dots for sustainable environmental remediation and photocatalytic hydrogen production – A review. *Journal of Environmental Management*, 250(109486), 1-15.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109486>.

MICHEA, S., et al. (2019). ENERGÍAS que mueven al mundo. Línea Editorial Aprende, 1(1), 1-122.

Disponible en: <https://doi.org/10.32457/ISBN9789568454470472019-ED1>.

MICHOPOULOS, A. (2020). Geothermal Developments in Cyprus - Country Update 2019. *Proceedings World Geothermal Congress*, 1-5.

Disponible en: <https://docplayer.net/175389458-Geothermal-developments-in-cyprus-country-update-2019.html>.

Ministerio de Energía y Minas. (2018). Balance Nacional de Energía 2018. Lima: MINEM.

Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/1905190-balance-nacional-de-energia-2018>.

MISHRA, A., et al. (2019). Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based metal free photocatalysts for water splitting: A review. *Carbon*, 4(104), 1-100.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.104>.

MOYA, D., ALDÁS, C., and KAPARAJU, P. (2018). Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 889-901.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.047>.

MUKHTAR, M., et al. (2022). Towards Global Cleaner Energy and Hydrogen Production: A Review and Application ORC Integrality with Multigeneration Systems. *Sustainability*, 14(5415), 1-25.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14095415>.

OLABI, A., et al. (2021). Application of graphene in energy storage device - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(110026), 1-20.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110026>.

OYEKALE, J., and 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.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09833>.

PARK, H., et al. (2020). N3-butyl imidazolium-based anion exchange membranes blended with Poly (vinyl alcohol) for alkaline water electrolysis . *Journal of Membrane Science*, 611(118355), 1-11.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118355>.

PAULILLO, A., STRIOLO, A., and 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.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105226>.

QURRAHMAN, A., et al. (2021). Energy and Exergy Analysis of Dieng Geothermal Power Plant. *International Journal of Technology*, 12(1), 175-185.

Disponible en: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i1.4218>.

SALAZAR, M., et al. (2017). Parametric analysis of the geothermal power: Dry-Steam, flash steam and hybrid cycle. *Revista DYNA*, 84(203), 273-282.

Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.66126>.

SAUNDERS, A. (2018). Energía Geotérmica. *Cubaenergía - Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía*.

Disponible

en:

https://www.researchgate.net/publication/337744582_La_Energia_Geotermica.

SHARMA, P., and MELKANIA, U. (2018). Effect of bioaugmentation on hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 7290-7298.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.031>.

SHARMA, S., et al. (2020). Waste to energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. *Science of The Total Environment*, 713(136633).

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>.

SHEIKHBAHAEI, V., BANIASADI, E., and NATERER, G. (2018). Experimental investigation of solar assisted hydrogen production from water and aluminum. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 9181-9191.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.196>.

TASHIE, B., and GODFREY, S. (2021). Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 1-19.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100172>.

TETTEH, E., AMANKWA, M., and YEBOAH, C. (2021). Emerging carbon abatement technologies to mitigate energy-carbon footprint- a review. *Cleaner Materials*, 2, 1-15.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100020>.

TIM, E., FLORIAN, H., and DIETER, B. (2019). Transient simulation of geothermal combined heat and power generation for a resilient energetic and economic evaluation. *Energies*, 12(894), 1-16.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en12050894>.

TRANAMIL, Y., et al. (2022). Assessing the Hybridization of an Existing Geothermal Plant by Coupling a CSP System for Increasing Power Generation. *Energies*, 15(1961), 1-28.

Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en15061961>.

TRUJILLO, P., y PÉREZ, J. (2022). Determinar las Características de una Central

Geotermoeléctrica en el campo geotérmico Calacoa-Putina en Moquegua. Chiclayo: Repositorio de la Universidad César Vallejo.

Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/98974>.

TURHAL, S., TURANBAEV, M., and ARGUN, H. (2018). Hydrogen production from melon and watermelon mixture by dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10(11), 1-7.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.011>.

UCHIDA, T., et al. (2018). Barriers to geothermal energy use in east and southeast Asia. *Research Gate*, 1, 1-5.

Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/325966638_BARRIERS_TO_GEOTHERMAL_ENERGY_USE_IN_EAST_AND_SOUTHEAST_ASIA.

WAHYUDI, W., et al. (2019). How vocational high-school students understand geothermal energy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(044059), 1-5.

Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/4/044059>.

WU, Y., et al. (2021). Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology*, 19, 1-15.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080>.

ZHANG, B., et al. (2021). Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology*, 19, 1-15.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080>.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de operacionalización de variable

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Energía geotérmica	Es aquella zona del subsuelo donde se puede extraer calor del interior de la Tierra, con el fin de aprovecharlo de forma rentable. Para determinar las características de funcionamiento es necesario conocer sus parámetros de funcionamiento, costos de explotación y costos de O y M (Tim <i>et al.</i> , 2019).	Los parámetros del campo geotérmico se obtendrán de forma experimental empleando la técnica de revisión documental, ya que se tiene un estudio previo de sus características.	Parámetros de funcionamiento	- Temperatura - Flujo de masa - Entalpía	De razón
			Costos de explotación	- Costo de extracción - Costo de Reinyección	De razón
			Costos de O y M	- Costo de operación - Costo de mantenimiento	De razón
Hidrógeno verde	El hidrógeno es uno de los elementos que más abunda en el mundo y también el más simple. Pero no se encuentra libre en la Tierra, esto es, en estado gaseoso, pero se encuentra combinado con múltiples elementos, por ejemplo, con el Oxígeno formando agua, con el Carbono formando Hidrocarburos y así con diferentes elementos (Fernández, 2022).	Se determina de acuerdo a diferentes artículos, investigaciones, informes, tesis, entre otros documentos necesarios para determinar el potencial que posee para lograr obtener su potencial disponible en el Perú.	Poder energético	- Aporte de energía - Capacidad calorífica - Capacidad térmica	De razón
			Costos de funcionamiento	- Costo de producción - Costos de Operación - Costos de mantenimiento	De razón

Anexo 3. Tablas de propiedades termodinámicas del R410a

TABLE B.4

Thermodynamic Properties of R-410a

TABLE B.4.1

Saturated R-410a

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

Fuente: (Borgnakke y Sonntag, 2019)

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

Fuente: (Borgnakke y Sonntag, 2019)

TABLE B.4.2
Superheated R-410a

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

Fuente: (Borgnakke y Sonntag, 2019)

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

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

Fuente: (Borgnakke y Sonntag, 2019)

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

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
	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

Fuente: (Borgnakke y Sonntag, 2019)

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

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

Fuente: (Borgnakke y Sonntag, 2019)

Anexo 4. Tablas de propiedades termodinámicas del agua

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líquido sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líquido sat., u_f	Evapor., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líquido sat., h_f	Evapor., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líquido sat., s_f	Evapor., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líquido sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líquido sat., u_f	Evapor., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líquido sat., h_f	Evapor., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líquido sat., s_f	Evapor., s_{fg}	Vapor sat., s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Las tablas A-4 a A-8 fueron generadas utilizando el programa para resolver ecuaciones de ingeniería (EES) desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. La rutina utilizada en los cálculos es la altamente precisa Steam_IAPWS, que incorpora la Formulación 1995 para las Propiedades Termodinámicas de la Sustancia Agua Ordinaria para Uso Científico y General, editada por The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). Esta formulación reemplaza a la formulación de 1984 de Haar, Gallagher y Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), la cual está también disponible en EES como la rutina STEAM. La nueva formulación se basa en las correlaciones de Saul y Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) con modificaciones para ajustarla a la Escala Internacional de Temperaturas de 1990. Las modificaciones están descritas por Wagner y Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). Las propiedades del hielo están basadas en Hyland y Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K a 473.15 K", ASHRAE Trans., Part 2A, Paper 2793, 1983.

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Líqu. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Líqu. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Líqu. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*				<i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)				<i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°C)				
Sat. [†]	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
<i>P</i> = 0.20 MPa (120.21°C)				<i>P</i> = 0.30 MPa (133.52°C)				<i>P</i> = 0.40 MPa (143.61°C)				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
<i>P</i> = 0.50 MPa (151.83°C)				<i>P</i> = 0.60 MPa (158.83°C)				<i>P</i> = 0.80 MPa (170.41°C)				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

*La temperatura entre paréntesis es la temperatura de saturación a la presión especificada.

† Propiedades del vapor saturado a la presión especificada.

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88 °C)				<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96 °C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04 °C)				
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37 °C)				<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11 °C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38 °C)				
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
<i>P</i> = 2.50 MPa (223.95 °C)				<i>P</i> = 3.00 MPa (233.85 °C)				<i>P</i> = 3.50 MPa (242.56 °C)				
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 4.0 MPa (250.35 °C)				<i>P</i> = 4.5 MPa (257.44 °C)				<i>P</i> = 5.0 MPa (263.94 °C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
<i>P</i> = 6.0 MPa (275.59 °C)				<i>P</i> = 7.0 MPa (285.83 °C)				<i>P</i> = 8.0 MPa (295.01 °C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
<i>P</i> = 9.0 MPa (303.35 °C)				<i>P</i> = 10.0 MPa (311.00 °C)				<i>P</i> = 12.5 MPa (327.81 °C)				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596				
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (conclusión)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 15.0 MPa (342.16 °C)				<i>P</i> = 17.5 MPa (354.67 °C)				<i>P</i> = 20.0 MPa (365.75 °C)				
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438								
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574
<i>P</i> = 25.0 MPa				<i>P</i> = 30.0 MPa				<i>P</i> = 35.0 MPa				
375	0.001978	1799.9	1849.4	4.0345	0.001792	1738.1	1791.9	3.9313	0.001701	1702.8	1762.4	3.8724
400	0.006005	2428.5	2578.7	5.1400	0.002798	2068.9	2152.8	4.4758	0.002105	1914.9	1988.6	4.2144
425	0.007886	2607.8	2805.0	5.4708	0.005299	2452.9	2611.8	5.1473	0.003434	2253.3	2373.5	4.7751
450	0.009176	2721.2	2950.6	5.6759	0.006737	2618.9	2821.0	5.4422	0.004957	2497.5	2671.0	5.1946
500	0.011143	2887.3	3165.9	5.9643	0.008691	2824.0	3084.8	5.7956	0.006933	2755.3	2997.9	5.6331
550	0.012736	3020.8	3339.2	6.1816	0.010175	2974.5	3279.7	6.0403	0.008348	2925.8	3218.0	5.9093
600	0.014140	3140.0	3493.5	6.3637	0.011445	3103.4	3446.8	6.2373	0.009523	3065.6	3399.0	6.1229
650	0.015430	3251.9	3637.7	6.5243	0.012590	3221.7	3599.4	6.4074	0.010565	3190.9	3560.7	6.3030
700	0.016643	3359.9	3776.0	6.6702	0.013654	3334.3	3743.9	6.5599	0.011523	3308.3	3711.6	6.4623
800	0.018922	3570.7	4043.8	6.9322	0.015628	3551.2	4020.0	6.8301	0.013278	3531.6	3996.3	6.7409
900	0.021075	3780.2	4307.1	7.1668	0.017473	3764.6	4288.8	7.0695	0.014904	3749.0	4270.6	6.9853
1000	0.023150	3991.5	4570.2	7.3821	0.019240	3978.6	4555.8	7.2880	0.016450	3965.8	4541.5	7.2069
1100	0.025172	4206.1	4835.4	7.5825	0.020954	4195.2	4823.9	7.4906	0.017942	4184.4	4812.4	7.4118
1200	0.027157	4424.6	5103.5	7.7710	0.022630	4415.3	5094.2	7.6807	0.019398	4406.1	5085.0	7.6034
1300	0.029115	4647.2	5375.1	7.9494	0.024279	4639.2	5367.6	7.8602	0.020827	4631.2	5360.2	7.7841
<i>P</i> = 40.0 MPa				<i>P</i> = 50.0 MPa				<i>P</i> = 60.0 MPa				
375	0.001641	1677.0	1742.6	3.8290	0.001560	1638.6	1716.6	3.7642	0.001503	1609.7	1699.9	3.7149
400	0.001911	1855.0	1931.4	4.1145	0.001731	1787.8	1874.4	4.0029	0.001633	1745.2	1843.2	3.9317
425	0.002538	2097.5	2199.0	4.5044	0.002009	1960.3	2060.7	4.2746	0.001816	1892.9	2001.8	4.1630
450	0.003692	2364.2	2511.8	4.9449	0.002487	2160.3	2284.7	4.5896	0.002086	2055.1	2180.2	4.4140
500	0.005623	2681.6	2906.5	5.4744	0.003890	2528.1	2722.6	5.1762	0.002952	2393.2	2570.3	4.9356
550	0.006985	2875.1	3154.4	5.7857	0.005118	2769.5	3025.4	5.5563	0.003955	2664.6	2901.9	5.3517
600	0.008089	3026.8	3350.4	6.0170	0.006108	2947.1	3252.6	5.8245	0.004833	2866.8	3156.8	5.6527
650	0.009053	3159.5	3521.6	6.2078	0.006957	3095.6	3443.5	6.0373	0.005591	3031.3	3366.8	5.8867
700	0.009930	3282.0	3679.2	6.3740	0.007717	3228.7	3614.6	6.2179	0.006265	3175.4	3551.3	6.0814
800	0.011521	3511.8	3972.6	6.6613	0.009073	3472.2	3925.8	6.5225	0.007456	3432.6	3880.0	6.4033
900	0.012980	3733.3	4252.5	6.9107	0.010296	3702.0	4216.8	6.7819	0.008519	3670.9	4182.1	6.6725
1000	0.014360	3952.9	4527.3	7.1355	0.011441	3927.4	4499.4	7.0131	0.009504	3902.0	4472.2	6.9099
1100	0.015686	4173.7	4801.1	7.3425	0.012534	4152.2	4778.9	7.2244	0.010439	4130.9	4757.3	7.1255
1200	0.016976	4396.9	5075.9	7.5357	0.013590	4378.6	5058.1	7.4207	0.011339	4360.5	5040.8	7.3248
1300	0.018239	4623.3	5352.8	7.7175	0.014620	4607.5	5338.5	7.6048	0.012213	4591.8	5324.5	7.5111

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

TABLA A-7

Agua líquida comprimida

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 5 MPa (263.94 °C)					<i>P</i> = 10 MPa (311.00 °C)				<i>P</i> = 15 MPa (342.16 °C)			
Sat.	0.0012862	1148.1	1154.5	2.9207	0.0014522	1393.3	1407.9	3.3603	0.0016572	1585.5	1610.3	3.6848
0	0.0009977	0.04	5.03	0.0001	0.0009952	0.12	10.07	0.0003	0.0009928	0.18	15.07	0.0004
20	0.0009996	83.61	88.61	0.2954	0.0009973	83.31	93.28	0.2943	0.0009951	83.01	97.93	0.2932
40	0.0010057	166.92	171.95	0.5705	0.0010035	166.33	176.37	0.5685	0.0010013	165.75	180.77	0.5666
60	0.0010149	250.29	255.36	0.8287	0.0010127	249.43	259.55	0.8260	0.0010105	248.58	263.74	0.8234
80	0.0010267	333.82	338.96	1.0723	0.0010244	332.69	342.94	1.0691	0.0010221	331.59	346.92	1.0659
100	0.0010410	417.65	422.85	1.3034	0.0010385	416.23	426.62	1.2996	0.0010361	414.85	430.39	1.2958
120	0.0010576	501.91	507.19	1.5236	0.0010549	500.18	510.73	1.5191	0.0010522	498.50	514.28	1.5148
140	0.0010769	586.80	592.18	1.7344	0.0010738	584.72	595.45	1.7293	0.0010708	582.69	598.75	1.7243
160	0.0010988	672.55	678.04	1.9374	0.0010954	670.06	681.01	1.9316	0.0010920	667.63	684.01	1.9259
180	0.0011240	759.47	765.09	2.1338	0.0011200	756.48	767.68	2.1271	0.0011160	753.58	770.32	2.1206
200	0.0011531	847.92	853.68	2.3251	0.0011482	844.32	855.80	2.3174	0.0011435	840.84	858.00	2.3100
220	0.0011868	938.39	944.32	2.5127	0.0011809	934.01	945.82	2.5037	0.0011752	929.81	947.43	2.4951
240	0.0012268	1031.6	1037.7	2.6983	0.0012192	1026.2	1038.3	2.6876	0.0012121	1021.0	1039.2	2.6774
260	0.0012755	1128.5	1134.9	2.8841	0.0012653	1121.6	1134.3	2.8710	0.0012560	1115.1	1134.0	2.8586
280					0.0013226	1221.8	1235.0	3.0565	0.0013096	1213.4	1233.0	3.0410
300					0.0013980	1329.4	1343.3	3.2488	0.0013783	1317.6	1338.3	3.2279
320									0.0014733	1431.9	1454.0	3.4263
340									0.0016311	1567.9	1592.4	3.6555
<i>P</i> = 20 MPa (365.75 °C)					<i>P</i> = 30 MPa				<i>P</i> = 50 MPa			
Sat.	0.0020378	1785.8	1826.6	4.0146	0.0009857	0.29	29.86	0.0003	0.0009767	0.29	49.13	-0.0010
0	0.0009904	0.23	20.03	0.0005	0.0009886	82.11	111.77	0.2897	0.0009805	80.93	129.95	0.2845
20	0.0009929	82.71	102.57	0.2921	0.0009951	164.05	193.90	0.5607	0.0009872	161.90	211.25	0.5528
40	0.0009992	165.17	185.16	0.5646	0.0010042	246.14	276.26	0.8156	0.0009962	243.08	292.88	0.8055
60	0.0010084	247.75	267.92	0.8208	0.0010155	328.40	358.86	1.0564	0.0010072	324.42	374.78	1.0442
80	0.0010199	330.50	350.90	1.0627	0.0010290	410.87	441.74	1.2847	0.0010201	405.94	456.94	1.2705
100	0.0010337	413.50	434.17	1.2920	0.0010445	493.66	525.00	1.5020	0.0010349	487.69	539.43	1.4859
120	0.0010496	496.85	517.84	1.5105	0.0010623	576.90	608.76	1.7098	0.0010517	569.77	622.36	1.6916
140	0.0010679	580.71	602.07	1.7194	0.0010823	660.74	693.21	1.9094	0.0010704	652.33	705.85	1.8889
160	0.0010886	665.28	687.05	1.9203	0.0011049	745.40	778.55	2.1020	0.0010914	735.49	790.06	2.0790
180	0.0011122	750.78	773.02	2.1143	0.0011304	831.11	865.02	2.2888	0.0011149	819.45	875.19	2.2628
200	0.0011390	837.49	860.27	2.3027	0.0011595	918.15	952.93	2.4707	0.0011412	904.39	961.45	2.4414
220	0.0011697	925.77	949.16	2.4867	0.0011927	1006.9	1042.7	2.6491	0.0011708	990.55	1049.1	2.6156
240	0.0012053	1016.1	1040.2	2.6676	0.0012314	1097.8	1134.7	2.8250	0.0012044	1078.2	1138.4	2.7864
260	0.0012472	1109.0	1134.0	2.8469	0.0012770	1191.5	1229.8	3.0001	0.0012430	1167.7	1229.9	2.9547
280	0.0012978	1205.6	1231.5	3.0265	0.0013322	1288.9	1328.9	3.1761	0.0012879	1259.6	1324.0	3.1218
300	0.0013611	1307.2	1334.4	3.2091	0.0014014	1391.7	1433.7	3.3558	0.0013409	1354.3	1421.4	3.2888
320	0.0014450	1416.6	1445.5	3.3996	0.0014932	1502.4	1547.1	3.5438	0.0014049	1452.9	1523.1	3.4575
340	0.0015693	1540.2	1571.6	3.6086	0.0016276	1626.8	1675.6	3.7499	0.0014848	1556.5	1630.7	3.6301
360	0.0018248	1703.6	1740.1	3.8787	0.0018729	1782.0	1838.2	4.0026	0.0015884	1667.1	1746.5	3.8102
380												

Fuente: (Cengel y Boles, 2019)

Anexo 5. Propiedades termodinámicas del agua saturada

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

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

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α 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.

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2020)

Anexo 6. Ficha técnica de turbina Siemens SST-600



This PDF offers an advanced interactive experience. This symbol indicates interactive content. ➤
For the best viewing experience, please use Acrobat Reader X or higher.

www.siemens.com/steamturbines

Siemens SST-600: Highly-versatile

Generator or mechanical drive – the Siemens SST-600 is configured for many possible applications.

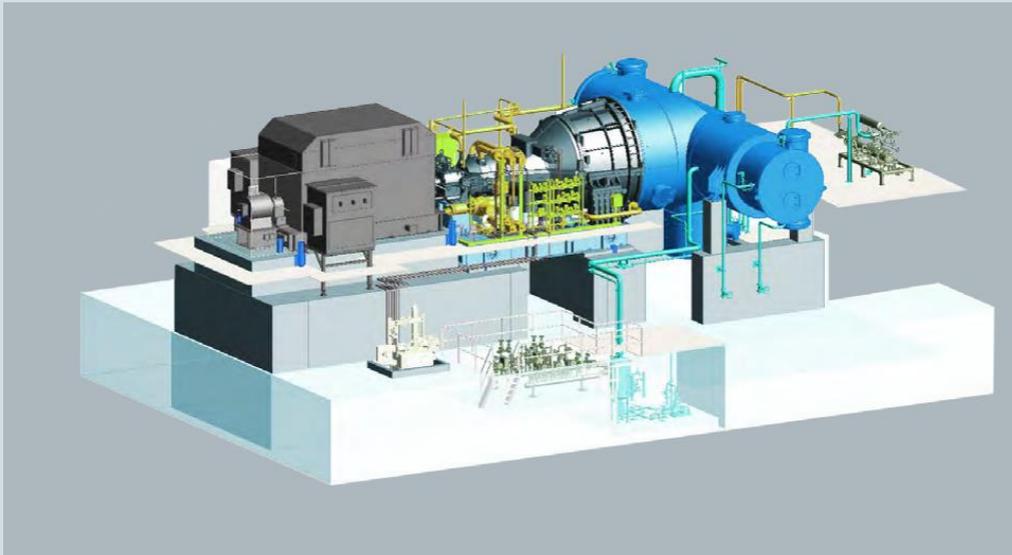
The flexible SST-600 packaging fits a broad range of customer needs. It can be designed for optimum back-fitting to an existing process, e.g. when a municipal utility is modernized.

Or, when space is limited, it can be adapted as a compact steam turbine package age with a small oil

pipng system, e.g. as a boiler feedwater pump drive.

Or it is also well suited where high-efficiency steam turbines are demanded with best-in-class blading and minimized losses.

Siemens SST-600 is the right answer to meet all of these different needs.



Standard steam turbine generator set

Generator drive in various packages

We deliver a standard steam turbine generator set including the SST-600 (with or without gearbox), a generator, oil system, piping and instrumentation and control system.

The standard package can be extended to include a condenser, condensing plant or pre-heating system.

Multi-casing solutions are also possible, enabling for example combined heat and power plants to easily respond to seasonal changes. In summer, when less district heating is needed, one turbine can be taken off the multi-casing steam turbine train.



SST-600 in Riskulla

Mechanical drive

The SST-600 is also an efficient and economic mechanical drive.

Since the 1970s, hundreds of projects have been successfully implemented all over the world using the SST-600 to directly drive everything from the smallest boiler feed water pump as as reliably as the biggest compressor even in the most complex processes. The SST-600 complies with regulations including the API standard.

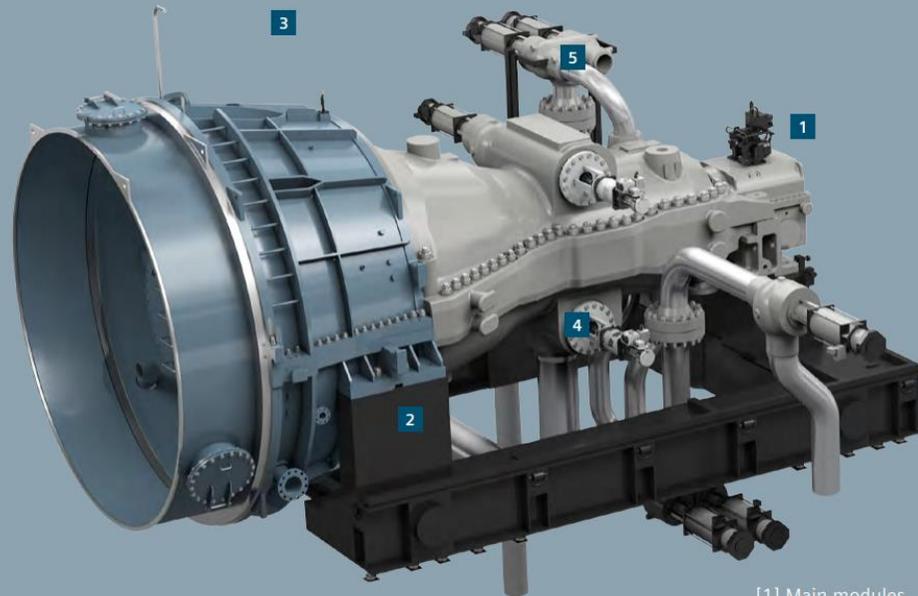
Siemens SST-600

The SST-600 is a single-casing steam turbine designed for operation within a speed range of 3,000 to 18,000 rpm for generators or mechanical drives up to 150 MW.

The turbine is used for both condensing and back-pressure applications, either geared or directly coupled.

The customized steam path is arranged according to the customer's needs.

The SST-600 with its reliable and flexible design is available with axial or radial exhaust.



- [1] Main modules
- [2] Package
- [3] Steam conditioning
- [4] Steam extraction
- [5] Steam inlets

Overview

The SST-600 can be used as:

- Generator drive
- Compressor drive
- Boiler feed water pump drive
- Blower drive



Design enhancements provide:

- Increased efficiency due to lower flow losses
- Reduced start-up times due to faster turbine heat-up
- Fast load changes
- Compact design for simplified transportation
- Simplified maintenance thanks to improved availability, horizontal casing split and independently accessible bearings

Siemens SST-600: Technical overview

Power output: up to 150 MW

Speed: 3,000 to 18,000 rpm

Controlled extractions (up to 2):

- Pressure, ext. valve ≤ 72 bar / 1,044 psi
- Pressure, int. valve ≤ 55 bar / 798 psi
- Temperature ≤ 480°C / 895° F

Uncontrolled extractions (up to 6):

- Pressure ≤ 85 bar / 1,233 psi

Live steam inlet pressure:

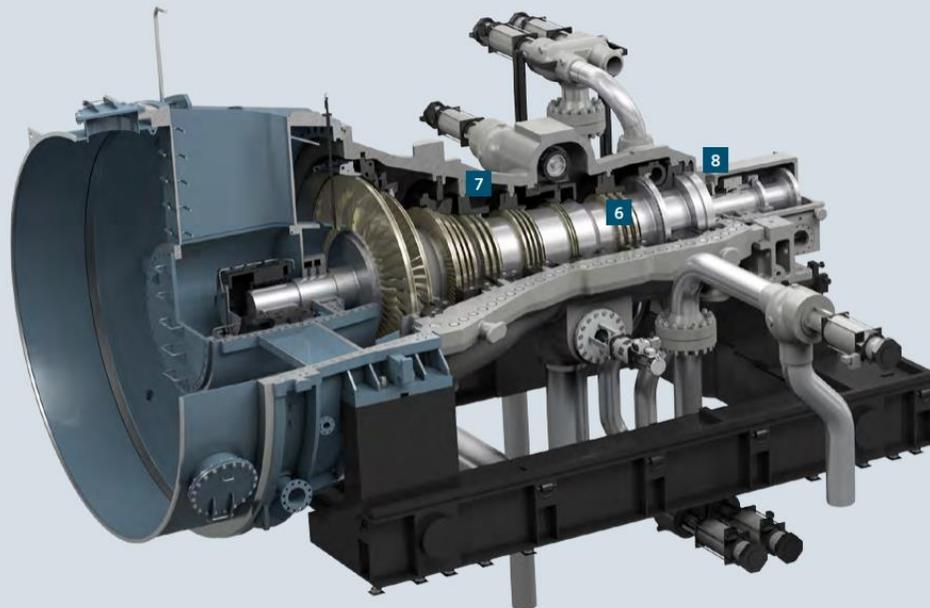
≤ 165 bar / ≤ 2,393 psi

Live steam inlet temperature :

≤ 565°C / ≤ 1,050° F

Exhaust conditions:

- Back pressure ≤ 80 bar / 1,160 psi
- Condensing ≤ 1.0 bar / 15 psi
- District heating ≤ 3.0 bar / 43 psi



- [6] Blades
- [7] Sealing
- [8] Casing and bearings

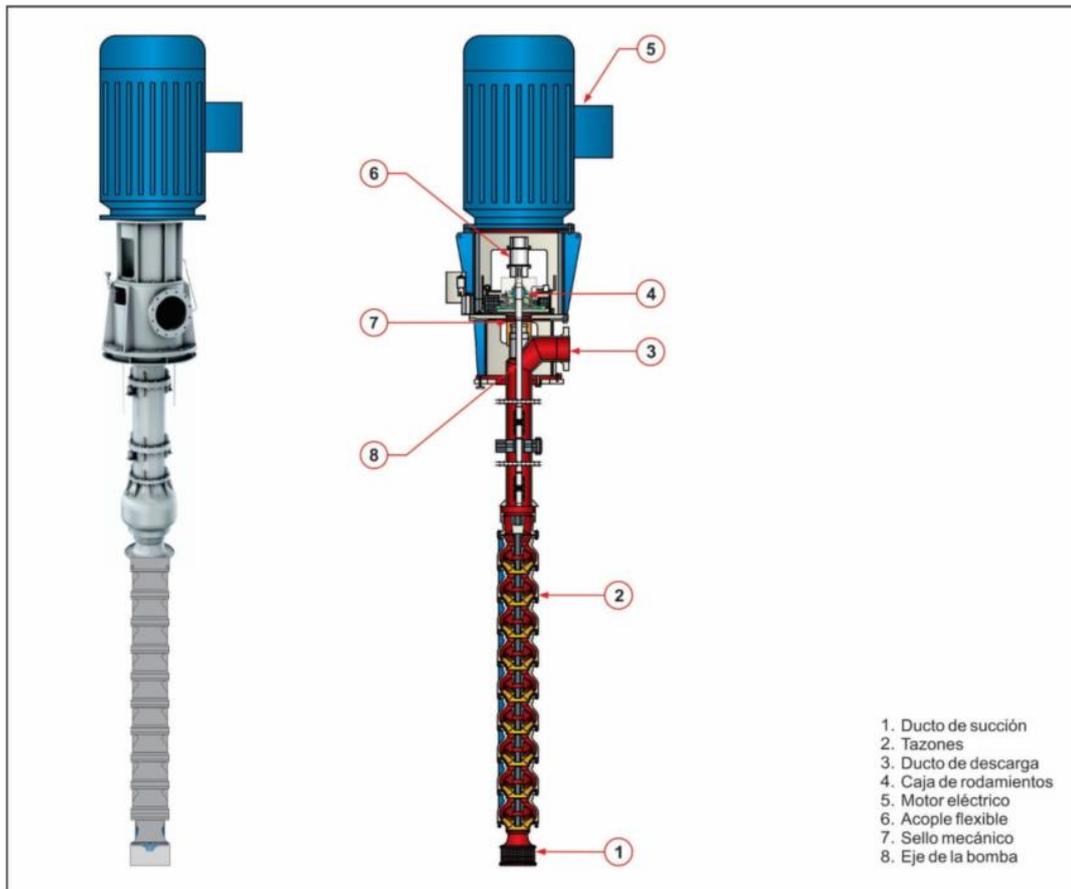
Chemical and petrochemical industry



Typical applications for the SST-600

- Chemical and petrochemical industry
- Pulp and paper mills
- Steel works
- Mines
- Power plants
- Seawater desalination plants
- Energy-from-waste plants (waste incinerators)

Anexo 7. Ficha técnica bomba sumergible SULZER PUMPS SJT 20DLC



2.1.1. CAPACIDAD DE DISEÑO Y DIMENSIONES DEL EQUIPO

DATOS TÉCNICOS	
Tag	1120-PU-001@005
Fabricante	SULZER
Modelo	SJT 20DLC
Tipo	Centrífuga vertical
N° de etapas	10
Ø de succión (mm/ pulg)	508/ 20
Ø de descarga (mm/ pulg)	304.8/ 12

DATOS TÉCNICOS	
Capacidad de diseño (m³/h)	693
NPSH disponible (mcf)	7
NPSH requerido (m)	4.3
Altitud de operación (m)	4,327.5
Velocidad de la bomba (rpm)	1,785
Potencia nominal (kW/ HP)	1,748/ 2,344
Eficiencia (%)	80

DATOS TÉCNICOS	
Presión de succión (kPa)	18.8
Presión de descarga (kPa)	7,281
Presión diferencial (kPa)	7,262
Tiempo de operación (h)	24

SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	
Motor eléctrico	
Fabricante	WEG
Modelo	MGR
Frame	80
Potencia (kW/ HP)	1,960/ 2,628
Factor de servicio	1.00
Voltaje/ Amperaje/ Frecuencia (V/ A/ Hz)	4,000/ 200/ 60
Velocidad (rpm)	1,790
N° de polos	4
Torque nominal (kN.m)	10.45
Acople	
Sistema de transmisión	Directo por acople
Tipo de acople	Flexible con espaciador
Fabricante	Crane

DATOS TÉCNICOS	
Modelo	KTR
CAJA DE RODAMIENTOS	
Material del eje	DUPLEX SS
Rodamiento lado motor	Rodamiento de bolas de contacto radial
Rodamiento lado impulsor	Rodamiento de bolas de contacto angular
IMPULSORES	
Tipo de impulsor	Cerrado
Ø mínimo del impulsor (mm/ pulg)	331/ 13
Ø nominal del impulsor (mm/ pulg)	331/ 13
N° de Impulsores	9
Material del impulsor	DUPLEX SS
SISTEMA DE SELLADO	
Tipo	Mecánico
Fabricante	John crane
Modelo	Burgmann
CARCASA	
Material de la carcasa	DUPLEX SS
Posición de descarga	Horizontal

Anexo 8. Ficha técnica de intercambiador de calor Alfa Laval CP120

Design



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

C-weld™



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

SmartClean™



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

XCore™



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

ALOnsite™

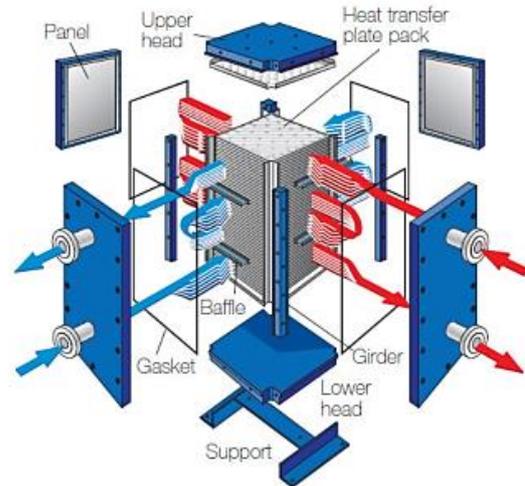
Learn more at www.alfalaval.com/compbloc

Technical data

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

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

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



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

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

* FV = Full Vacuum

** Standard maximum design conditions for ASME design

Compabloc

A proven solution for improving sustainability

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

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

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

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

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



C-Weld™

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



SmartClean™

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



XCore™

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



ALOnsite™

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



Compabloc range



Anexo 9. Ficha técnica de electrolizador HyLYZER – 5.000 – 30

Alkaline & PEM electrolysis | Product's line

Alkaline



PEM (Proton Exchange Membrane)



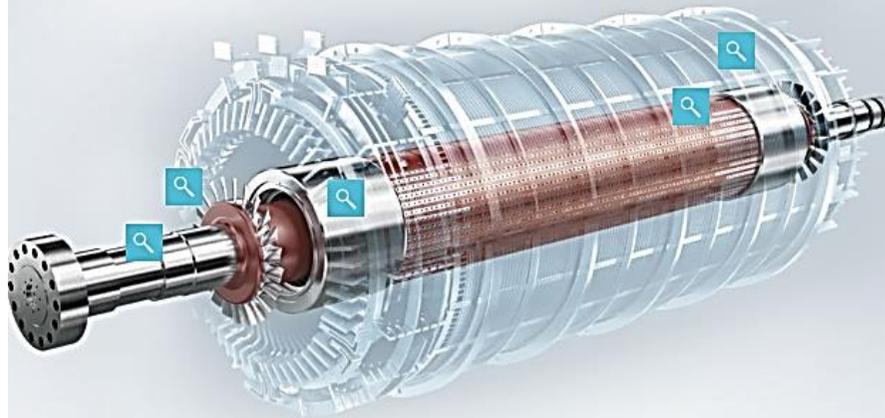
	HySTAT®-15-10	HySTAT®-60-10	HySTAT®-100-10	HyLYZER® -300-30	HyLYZER® -1.000-30	HyLYZER® -5.000-30
Output pressure	10 barg (27 barg optional)			30 barg		
Number of cell stacks	1	4	6	1	2	10
Nominal Hydrogen Flow	15 Nm ³ /h	60 Nm ³ /h	100 Nm ³ /h	300 Nm ³ /h	1.000 Nm ³ /h	5.000 Nm ³ /h
Nominal input power	80 kW	300 kW	500 kW	1.5 MW	5 MW	25 MW
AC power consumption (utilities included, at nominal capacity)	5.0-5.4 kWh/Nm ³			5.0-5.4 kWh/Nm ³		
Hydrogen flow range	40-100%	10-100%	5-100%	1-100%		
Hydrogen purity	99.998% O2 < 2 ppm, N2 < 12 ppm (higher purities optional)			99.998% O2 < 2 ppm, N2 < 12 ppm (higher purities optional)		
Tap water consumption	<1.4 liters / Nm ³ H2			<1.4 liters / Nm ³ H2		
Footprint (in containers)	1 x 20 ft	1 x 40 ft	1 x 40 ft	1 x 40 ft	2 x 40 ft	10 x 40 ft
Footprint utilities (optional)	Incl.	Incl.	Incl.	1 x 20 ft	1 x 20 ft	5 x 20 ft

Anexo 10. Ficha técnica generador Siemens SGen6-100A-2P

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

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

Tubos A53 /A106 API 5L/GR B

Presión de Trabajo vs. Temperatura

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