



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“Análisis del uso de hidrógeno y energía
geotérmica para la transición energética en el Perú”**

Presentado Por:

Bach. Anthony Arson Ochoa Mora

Asesor:

M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera

LAMBAYEQUE – PERÚ

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“Análisis del uso de hidrógeno y energía
geotérmica para la transición energética en el
Perú”**

Presentado Por:

Bach. Anthony Arson Ochoa Mora

Aprobado por el Jurado Examinador

PRESIDENTE:	M.Sc. Ing. Carlos Yupanqui Rodríguez
SECRETARIO:	M.Sc. Lic. Egberto Serafín Gutiérrez Atoche
MEMBRO:	M.Sc. Ing. Teobaldo Edgar Julca Orozco
ASESOR:	M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera

Lambayeque – Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA y ELÉCTRICA



TESIS

TÍTULO

**“Análisis del uso de hidrógeno y energía geotérmica
para la transición energética en el Perú”**

CONTENIDOS

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

CAPITULO V: ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

AUTOR: Bach. Anthony Arson Ochoa Mora

M.Sc. Ing. Carlos Yupanqui Rodríguez
Presidente

M.Sc.Lic. Egberto Serafín Gutiérrez Atoche
Secretario

M.Sc Ing. Teobaldo Edgar Julca Orozco
Vocal

M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera
Asesor

Lambayeque – Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DECANATO



ACTA DE SUSTENTACION N°0131-2025-FIME



En la ciudad de Lambayeque, siendo las 12:30 p.m. del día Jueves 04 de diciembre 2025. Se reunieron los miembros del jurado, designados mediante Resolución N°393-2025-D-FIME, de fecha 24 de noviembre 2025, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la Tesis, conformado por los siguientes catedráticos:

- M.Sc. Ing. CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ
- M.Sc. Lic. EGBERTO SERAFIN GUTIERREZ ATOCHE
- M.Sc. Ing. TEOBALDO EDGAR JULCA OROZCO
- M.Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA

PRESIDENTE
SECRETARIO
MIEMBRO
ASESOR

Se recibió la Tesis titulada:

"ANALISIS DEL USO DE HIDROGENO Y ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGETICA EN EL PERU"

Presentada y sustentada por su autor, Bachiller: **OCHOA MORA ANTHONY ARSON**

Finalizada la sustentación de la Tesis, el sustentante respondió las preguntas y observaciones de los miembros del jurado examinador, quienes procedieron a deliberar y acordaron otorgar el calificativo de **APROBADO**, Nota (14) en la escala vigesimal, mención Buena.
Quedando el sustentante apto para obtener el Título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, de acuerdo a la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las **01:16 pm** del mismo día se da por concluido el acto académico, firmando la presente acta el jurado respectivo:

M.Sc. Ing. CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ
PRESIDENTE

M.Sc. Lic. EGBERTO SERAFIN GUTIERREZ
SECRETARIO

M.Sc. Ing. TEOBALDO EDGAR JULCA OROZCO
MIEMBRO

M.Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Dr. Ing. AMADO AGUIRRE
Decano

ANEXO 01

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, **M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera**, usuario revisor del documento titulado: **“ANÁLISIS DEL USO DE HIDRÓGENO Y ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN EL PERÚ”**.

Cuyo autor es, **Ochoa Mora Anthony Arson**, identificado con documento de identidad **N° 73654180** declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de **11%**, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque 11 de agosto del 2026



.....
M.SC. ING. JONY VILLALOBOS CABRERA

DNI: 16699530

ASESOR

Se adjunta:

*Resumen del Reporte automático de similitudes

*Recibo Digital

ANÁLISIS DEL USO DE HIDRÓGENO Y ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN EL PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	4%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.unprg.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
3	Submitted to Universidad Andrés Bello	1%
	Trabajo del estudiante	
4	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo	<1%
	Trabajo del estudiante	
5	www.researchgate.net	<1%
	Fuente de Internet	
6	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.unap.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	



M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera
DNI: 16699530
ASESOR



Recibo digital

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

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Anthony Arson Ochoa Mora
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: ANÁLISIS DEL USO DE HIDRÓGENO Y ENERGÍA GEOTÉRMICA P...
Nombre del archivo: TESIS_AAOM_13-5-2025.docx
Tamaño del archivo: 10.12M
Total páginas: 97
Total de palabras: 15,975
Total de caracteres: 87,314
Fecha de entrega: 18-may.-2025 09:07p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2679 283828



UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

"ANÁLISIS DEL USO DE HIDRÓGENO Y ENERGÍA
GEOTÉRMICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA
EN EL PERÚ"

Presentado Por:
Bach. Anthony Arson Ochoa Mora

Asesor:
Ing. Jony Villalobos Cabrera

LAMBAYEQUE – PERÚ
2025


M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera
DNI: 16699530
ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres y docentes de la FIME-UNPRG, mi más profundo reconocimiento. Gracias por su entrega incansable y su constante guía, pilares fundamentales en la formación de cada estudiante. Mis padres, con su amor incondicional y apoyo silencioso, han sido el motor que ha impulsado cada logro. A mis docentes, con su compromiso y sabiduría, han sembrado conocimiento y valores que perdurarán toda la vida. Ustedes han sabido construir un entorno de esfuerzo, perseverancia y superación, marcando un camino firme hacia el futuro. Esta dedicatoria es un pequeño homenaje a su inmensa labor, que muchas veces no se ve, pero que siempre se siente y cada paso que damos como profesionales lleva consigo su huella. A ustedes, gracias por ser parte esencial de esta historia de crecimiento, esfuerzo y sueños cumplidos.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un sincero agradecimiento a mis padres y docentes de la FIME-UNPRG. A ustedes, que han estado presentes en cada paso, brindando ánimo, guía y apoyo incondicional. A mis padres, por confiar en mí, por su paciencia, sacrificio y fe constante en mi potencial. A mis docentes, por su entrega diaria, por compartir su conocimiento con pasión y formar no solo profesionales, sino también personas íntegras. Gracias por ser ejemplo de responsabilidad, perseverancia y compromiso. Cada logro alcanzado lleva impresa su influencia y este agradecimiento es una forma de reconocer que, sin ustedes, este viaje no tendría el mismo sentido ni la misma fortaleza. Ustedes han sido la base y el impulso para avanzar, por tanto, reciban, con humildad y cariño, este mensaje de gratitud que nace desde el corazón.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo analizar el uso de la energía geotérmica para producir hidrógeno con el propósito de lograr la transición energética en el Perú. El tipo de investigación fue aplicada, con un diseño de investigación no experimental. La población fue el hidrógeno y la energía geotérmica disponible en el Perú, donde la muestra fue el campo geotérmico de Calacoa-Putina, ya que se empleó para realizar el análisis termodinámico y así dar respuesta al propósito del estudio. Del análisis se obtuvo que el potencial de la energía geotérmica disponible en el país es de 2.86 GWe, concentrada en la zona sur que posee un potencial de 897 MWe. Del análisis termodinámico realizado, el flujo de masa de 286.54 kg/s para generar la potencia requerida, con una producción del pozo geotérmico de 663.59 kg/s, considerando 4 pozos geotérmicos de 165.8975 kg/s, produciendo 2040.82 kg/h de hidrógeno y 16326.56 kg/h de oxígeno. Se demostró que se puede reducir en 92.92% las emisiones de gases contaminantes por año (203494.8 toneladas de CO₂), demostrando la importancia de utilizar energía geotérmica para lograr la transición energética. Finalmente, el análisis de rentabilidad dio un VAN de S/.1015194977.65, TIR de 31.63% y Payback de 3.88 años.

Palabras clave: Energía geotérmica, hidrógeno, campo geotérmico, rentabilidad.

ABSTRACT

The objective of the study was to analyze the use of geothermal energy to produce hydrogen for the purpose of achieving the energy transition in Peru. The research was applied, with a non-experimental research design. The population was hydrogen and geothermal energy available in Peru, where the sample was the Calacoa-Putina geothermal field, which was used to perform the thermodynamic analysis and thus meet the stated objectives. The analysis revealed that the geothermal energy potential available in the country is 2.86 GWe, concentrated in the southern zone, which has a potential of 897 MWe. From the thermodynamic analysis performed, a mass flow rate of 286.54 kg/s was obtained to generate the required power, with a geothermal well production of 663.59 kg/s, considering 4 geothermal wells of 165.8975 kg/s, producing 2040.82 kg/h of hydrogen and 16326.56 kg/h of oxygen. It was demonstrated that polluting gas emissions can be reduced by 92.92% (203494.8 tons of CO₂ annually), demonstrating the importance of using geothermal energy to achieve the energy transition. Finally, the profitability analysis gave an NPV of S/. 1015194977.65, IRR of 31.63% and Payback of 3.88 years.

Keywords: Geothermal energy, hydrogen, geothermal field, profitability.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	13
Capítulo I : PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1. Realidad problemática.....	14
1.2. Formulación del problema.....	15
1.3. Delimitación de la investigación	15
1.4. Justificación e importancia	15
1.4.1. Justificación económica.....	15
1.4.2. Justificación Científica	15
1.4.3. Justificación Ambiental	15
1.4.4. Justificación Social.....	16
1.5. Limitaciones	16
1.6. Objetivos	16
1.6.1. Objetivo General	16
1.6.2. Objetivos Específicos.....	16
Capítulo II : MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes de estudio.....	17
2.2. Recurso Energético Renovable.....	20
2.2.1. Energía Geotérmica.....	20
2.2.2. Flujo de calor de la Tierra y Gradiente Geotérmico	21
2.2.3. Yacimiento Geotérmico.....	22
2.2.4. Planta geotérmica tipo Binario (Binary plants)	22
2.2.5. Energía geotérmica a nivel mundial	24
2.2.6. Ventajas y desventajas de la energía geotérmica.....	26

2.2.7.	Energía geotérmica en el Perú	27
2.2.8.	Factor de capacidad para varias fuentes de energía	28
2.2.9.	Costo nivelado de la electricidad (LCOE)	29
2.2.10.	Costos y riesgos de un proyecto con energía geotérmica	31
2.3.	Hidrógeno.....	31
2.3.1.	Historia.....	32
2.3.2.	Propiedades fisicoquímicas	33
2.3.3.	Propiedades con respecto al gas natural.....	34
2.3.4.	Contenido de energía del H	35
2.3.5.	Densidad de energía.....	36
2.3.6.	Ventajas y desventajas del hidrógeno	36
2.4.	Transición energética.....	37
2.5.	Análisis de rentabilidad	38
2.6.	Definición conceptual de la terminología empleada	39
Capítulo III :	MARCO METODOLÓGICO	42
3.1.	Tipo y diseño de investigación	42
3.2.	Población y muestra.....	42
3.3.	Hipótesis	42
3.4.	Variables – Operacionalización.....	42
3.5.	Métodos y técnicas de investigación	44
3.5.1.	Técnicas de investigación.....	44
3.6.	Descripción de los instrumentos utilizados.....	44
3.7.	Análisis estadístico e interpretación de los datos	44
Capítulo IV :	PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN.....	46
Capítulo V :	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	47
5.1.	Resultados	47
5.1.1.	Recopilar información respecto al hidrógeno y la energía geotérmica disponibles en el Perú	47
5.1.2.	Analizar el potencial geotérmico para generar hidrógeno	52
5.1.3.	Determinar el impacto ambiental de emplear hidrógeno y energía geotérmica para la transición energética en el Perú.....	61
5.1.4.	Evaluar los parámetros financieros para determinar la rentabilidad de emplear energía geotérmica para generar hidrógeno.....	62

5.2. Discusión de resultados	69
Capítulo VI : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
6.1. Conclusiones.....	71
6.2. Recomendaciones.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comparación de costos nivelados de la electricidad.....	30
Tabla 2	Propiedades físicas del hidrógeno y del GN	35
Tabla 3	Densidades de energía para diferentes combustibles importantes.....	36
Tabla 4	Cuadro de Operacionalización de variables.....	43
Tabla 5	Instrumentos utilizados	44
Tabla 6	Campos geotérmicos disponibles en el Perú	48
Tabla 7	Tecnologías de Producción de hidrógeno y su rendimiento actual	50
Tabla 8	Campos geotérmicos y su potencial para desarrollo.....	54
Tabla 9	Cálculo de la presión para el pozo de extracción.....	55
Tabla 10	Cálculo del volumen específico estado 1	55
Tabla 11	Cálculo de la entalpía de líquido saturado estado 1.....	55
Tabla 12	Cálculo de la entalpía de vapor saturado estado 1	55
Tabla 13	Cálculo de la entropía de líquido saturado estado 1	56
Tabla 14	Cálculo de la entropía de vapor saturado estado 1.....	56
Tabla 15	Inversión para central geotérmica para producción de hidrógeno	62
Tabla 16	Horizontes de evaluación para proyectos de inversión	63
Tabla 17	Ahorro monetario obtenido debido a generación de potencia y energía.....	64
Tabla 18	Ingresos obtenidos por las ventas de hidrógeno (2024-2043)	64
Tabla 19	Ingresos obtenidos por las ventas de oxígeno (2024-2043)	65
Tabla 20	Expectativa de inflación (2022-2023)	65
Tabla 21	Análisis de indicadores de rentabilidad, considerando una inflación anual del 4% y una tasa de interés de 9% anual	67
Tabla 22	Indicadores para análisis de rentabilidad	67
Tabla 23	Indicadores de rentabilidad	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diferentes tipos de energías renovables libres en el mundo	20
Figura 2 Energía geotérmica en el mundo.....	21
Figura 3 Temperaturas de la Tierra de acuerdo a la profundidad.....	22
Figura 4 Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario.....	23
Figura 5 Capacidad instalada de energía geotérmica en MW en 2015	25
Figura 6 Los 10 países con la mayor potencia instalada en energía geotérmica	26
Figura 7 Mapa del Perú y su potencial geotérmico.....	28
Figura 8 Factor de capacidad por tipo de energía para 2020	29
Figura 9 Costo nivelado global de tecnologías de producción de energía renovable a gran escala.....	30
Figura 10 Costos y riesgos en un proyecto de energía geotérmica en desarrollo	31
Figura 11 Principio de operación de una pila de combustible tipo MIP con hidrógeno	32
Figura 12 Producción sostenible de Hidrógeno	33
Figura 13 Fuentes y método de generar hidrógeno.....	35
Figura 14 Hidrógeno en el ambiente	37
Figura 15 Reducción de emisiones de carbono para el escenario de 1.5°C en porcentaje.....	38
Figura 16 Costo nivelado LCOE (\$/MWh) para energías renovables y convencionales 2018.....	51
Figura 17 Costo nivelado LCOE (\$/MWh) para energías renovables y convencionales 2050.....	51
Figura 18 Gráfica evolutiva tendencial del costo nivelado LCOE (USD/MWh)	52
Figura 19 Esquema de una planta geotérmica para generar hidrógeno y oxígeno	53

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es sabido que usar combustibles fósiles conlleva un impacto negativo en el medio ambiente por la contaminación que origina la combustión de los mismos, es por ello, que es importante y necesario buscar alternativas que permitan reducir la contaminación ambiental originada por la producción de energía eléctrica y otros tipos de energías al emplear fuentes primarias de energía no convencionales o no renovables. Ya existen diversos tipos de energías renovables que permiten obtener energía eléctrica sin generar un impacto negativo al medio ambiente, como son la energía solar fotovoltaica, eólica, mareomotriz, geotérmica e hidrógeno, enfatizando que la presente investigación se enfocará en la energía geotérmica y la producción de hidrógeno para poder analizar de qué forma se puede llegar a obtener la transición energética en el Perú, es decir, con el uso de dichas fuentes de energía renovable, reducir a lo más mínimo la contaminación del medio ambiente o mitigar el impacto ambiental al momento de producir electricidad u otro tipo de energía para uso humano. Por ejemplo, la energía geotérmica en el Perú es realmente abundante, la cual puede suplir gran parte de la potencia eléctrica del país, en especial, en la zona sur, ya que es donde más se concentra. Dicha energía tiene un potencial de 3 GW o 3 000 MW, a la vez que se logra satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica y al mismo tiempo se conserva el medioambiente, siendo uno de los más grandes retos que afronta la humanidad. El uso del hidrógeno para diferentes aplicaciones como calor, transporte y materias primas en la industria de la minería puede contribuir positivamente a la economía del hidrógeno en el país, transformando al país en un potencial para poder suministrar hidrógeno verde de forma competitiva en el mundo. Según estudios, el país podría tener un potencial de generación en hidrógeno verde de 850 MW para el 2030, con un costo de aproximadamente de \$5.23/kg de hidrógeno, pero solo para poder consumirse localmente.

CAPÍTULO I : PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad problemática

Desde el siglo XX y actualmente se han empleado a las fuentes primarias energéticas como una prioridad, es decir, los llamados combustibles del tipo fósil, específicamente, el petróleo, carbón y gas natural. Pero es sabido que ocasionan un daño al medio ambiente debido a su efecto contaminante, por lo que se busca su reemplazo en el mediano plazo por energías del tipo renovables y que no sean perjudiciales al medio ambiente, como son la solar, geotérmica, eólica, etcétera (Corredor, 2018). El hidrógeno es uno de los elementos químicos con mayor presencia en el planeta y, al mismo tiempo, el más simple en términos atómicos. No obstante, no se encuentra en estado libre en la corteza terrestre, es decir, como gas molecular (H_2). En su lugar, aparece formando compuestos con diversos elementos, tales como el oxígeno, con el que constituye el agua (H_2O), o el carbono, con el que forma hidrocarburos, entre otras posibles combinaciones químicas (Fernández, 2022).

Es importante tener presente el panorama de la situación energética del país y del mundo, para poder comprender mejor como llevar a cabo la transición energética para mejorar la matriz energética y, por ende, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Blanco, 2019).

La definición de transición energética justa, con un énfasis especial considerando el aporte potencial para el sector residencial. Es por ello, que se realizaron análisis sobre transiciones recientes y de políticas sobre rendimiento energético residencial en Brasil, Colombia, Chile, Argentina, Uruguay y México. Teniendo en cuenta ciertos aspectos de importancia, se menciona que las transiciones energéticas están estrechamente relacionadas con el reemplazo de fuentes energéticas especialmente para generación de electricidad, y que existe un camino largo por andar (Recalde et al., 2018). Por lo que se fundamenta la presente investigación que es analizar el empleo del uso del hidrógeno y energía geotérmica para la transición energética en el Perú.

1.2. Formulación del problema

¿Se logra la transición energética en el Perú empleando energías renovables como el hidrógeno y la energía geotérmica?

1.3. Delimitación de la investigación

El actual proyecto de investigación se desarrolló en el ámbito del territorio nacional, es decir, en la ciudad de Lambayeque, pero que abarca un análisis de todo el territorio nacional en mención a sus recursos energéticos.

El tiempo estipulado para el desarrollo del proyecto fue de aproximadamente cuatro meses.

1.4. Justificación e importancia

En la actualidad existe una enorme demanda de energía eléctrica originada por las grandes metrópolis alrededor del mundo entero, y esto ocasiona un aumento en la contaminación y producción de GEI, es por ello que ahora se busca reemplazar las fuentes empleadas para generar electricidad por fuentes del tipo renovables con cero emisiones de contaminantes al medio ambiente.

1.4.1. Justificación económica

La presente investigación se justifica económicamente debido a que, al reducir los efectos de los GEI, ya no se incurre en otros gastos para mitigarlos porque justamente para eso sirven las energías del tipo renovables como el hidrógeno y energía geotérmica, para permitir en el largo plazo, lograr dejar un mejor planeta para las futuras generaciones.

1.4.2. Justificación Científica

De forma científica se justifica debido a que se hizo una investigación sobre dos tipos de energías renovables con un gran potencial para la transición energética en el Perú, siendo el hidrógeno como la geotérmica, poco conocidas en el territorio nacional, donde sirvió como base para futuras investigaciones relacionadas al tema investigado.

1.4.3. Justificación Ambiental

Al emplear hidrógeno y la energía geotérmica siendo energías renovables,

se origina una reducción en la contaminación del medio ambiente y al deterioro de la capa de ozono.

1.4.4. Justificación Social

Al aprovechar el hidrógeno y la energía geotérmica como recurso para la generación eléctrica, se puede beneficiar a muchos hogares del país, ya que la energía eléctrica que se puede generar puede ser inyectada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional y así poder contribuir al crecimiento de la economía y de la calidad de vida de la población.

1.5. Limitaciones

Entre las limitaciones que se encontraron durante el proceso de desarrollo de la actual investigación es la recopilación de información y su posterior procesado, ya que fue bastante para ser procesada toda, pero se hizo el esfuerzo de emplear lo más resaltante.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Analizar el uso de la energía geotérmica para producir hidrógeno con el propósito de lograr la transición energética en el Perú.

1.6.2. Objetivos Específicos

- a) Recopilar información respecto al hidrógeno y la energía geotérmica disponible en el Perú.
- b) Realizar un análisis del potencial geotérmico para generar hidrógeno.
- c) Determinar el impacto ambiental de emplear hidrógeno y energía geotérmica para la transición energética en el Perú.
- d) Evaluar los parámetros financieros para determinar la rentabilidad de emplear energía geotérmica para generar hidrógeno.

CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Contexto Internacional

Kuchen y Kozak (2020) señalan que el sector edilicio es responsable de aproximadamente el 40 % de la demanda energética global, mientras que en Argentina esta participación alcanza el 37 %, siendo la climatización el principal componente del consumo. En respuesta a esta situación, Argentina ha adoptado el estándar IRAM 11900, orientado a fomentar la eficiencia energética (EE) en el ámbito residencial, con un enfoque inclusivo y alineado con los objetivos de transición energética hacia 2050. En este contexto, el estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño termo-energético de un prototipo existente de vivienda social en el Barrio Papa Francisco, así como de sus versiones mejoradas mediante estrategias de rehabilitación (retrofit) y planificación anticipada (ex ante), conforme a los lineamientos de dicha norma. De los resultados, se obtuvo un índice de prestaciones energéticas (IPE) de $132 \text{ kWh}_{prim.}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$. Adicionalmente, las variantes denominadas “retrofit” y “ex ante” hacen referencia a ahorros del tipo económico.

En su estudio, Gielen et al. (2019) analizan los aspectos técnicos y económicos asociados a una transición energética acelerada hacia el año 2050, utilizando conjuntos de datos actualizados relacionados con fuentes de energía renovable. El estudio concluye que tanto la eficiencia energética como las tecnologías basadas en energías renovables constituyen pilares fundamentales de dicha transición, destacándose también la relevancia de las sinergias entre ambas. Esta transformación está respaldada por factores como la viabilidad económica, la disponibilidad generalizada de recursos, el carácter escalable de las tecnologías implicadas y los beneficios socioeconómicos sustanciales. Según el análisis, las fuentes renovables tienen el potencial de cubrir aproximadamente dos tercios del consumo energético global y desempeñar un papel central en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en línea con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media global a menos de 2°C para 2050. Para alcanzar esta meta, es necesario reformar los marcos regulatorios existentes con el fin de

posibilitar una expansión de las energías renovables a un ritmo seis veces mayor al actual, con un protagonismo destacado de las tecnologías eólica y solar fotovoltaica, en combinación con una mejora considerable en eficiencia energética. No obstante, la descarbonización completa exigirá avances tecnológicos e innovación adicional, particularmente en los sectores de transporte y manufactura, que han recibido una atención limitada en el debate global. Asimismo, se requiere un enfoque más profundo en los desafíos de infraestructura emergentes, como el desarrollo de redes de carga y otros aspectos relacionados con la integración sectorial.

En su estudio, Yue et al. (2021) demostraron la necesidad de avanzar hacia una transición energética global orientada a una sociedad con emisiones netas de carbono nulas. Esta transformación exige una reconfiguración profunda tanto en los sistemas de generación y consumo eléctrico como en las infraestructuras energéticas en su conjunto. En este contexto, el hidrógeno se perfila como un vector energético con alto potencial para acelerar la expansión de fuentes limpias y renovables; no obstante, su integración efectiva en los sistemas energéticos aún constituye un área poco explorada. Este documento revisa el progreso actual y las perspectivas de las tecnologías del hidrógeno y su aplicación en los sistemas de energía para la producción, reelectrificación y almacenamiento de hidrógeno. Las características de los electrolizadores y las pilas de combustible se demuestran con datos experimentales y los despliegues de hidrógeno para almacenamiento de energía, conversión de energía a gas, cogeneración y trigeneración y transporte se investigan utilizando ejemplos de proyectos de todo el mundo. Se presenta el estado técnico-económico actual de estas tecnologías y aplicaciones, en el que se identifican el costo, la eficiencia y la durabilidad como los principales aspectos críticos. Esto también es confirmado por los resultados de un análisis estadístico de la literatura. Finalmente, las conclusiones muestran que se requieren esfuerzos continuos para mejorar el rendimiento, aumentar la escala, las perspectivas técnicas y el apoyo político para permitir una economía del hidrógeno competitiva en costos.

Contexto Nacional

Zanabria Sequeiros (2019) en su trabajo de investigación buscó perfeccionar la regulación en consideración con las energías renovables no convencionales en el ámbito actual sobre la transición energética mediante la utilización de fuentes de producción de electricidad con reducción significativa en contaminación, donde Arabia Saudita (primer exportador de petróleo) fijó como meta al año 2023, que la producción de electricidad empleando fuentes de energías renovables no convencionales (RER) logren una representación del 10% de su matriz energética. Otro ejemplo tenemos en la Unión Europea, buscando al 2030 tener un 30% de su generación de electricidad mediante el uso de RER; en Latinoamérica tenemos a Chile, Colombia, Argentina y Ecuador, con un 20%; pero el Perú aún no tiene un plan trazado ni definido.

Gamio Aita (2018) en su artículo sobre transición energética, menciona que el país tiene el deber y compromiso de buscar la reducción de las emisiones de contaminantes perjudiciales para el medio ambiente, el cual se concpciona en el Tratado de París de 2015. Es por eso, que se debe buscar la aceleración de forma gradual en la matriz energética, buscando la eficiencia de emplear energías limpias y logrando un crecimiento descentralizado sostenible. La gobernabilidad y la capacidad de respuesta frente al cambio climático se encuentran en una posición crítica, lo que subraya la urgencia de redefinir la política energética. Este proceso exige un enfoque de planificación estratégica integral, que contemple objetivos claramente definidos a corto, mediano y largo plazo. En este contexto, el Perú se encuentra en el proceso de diseñar e implementar su propia ruta hacia una transición energética sostenible.

En su informe sobre el potencial del hidrógeno verde en el Perú, ENGIE (2021) destaca la necesidad urgente de que el país defina, en el corto plazo, el papel que desea desempeñar dentro de la economía global del hidrógeno, así como de formular respuestas a interrogantes clave que sustenten una planificación estratégica bien informada. En un entorno regional y mundial altamente competitivo, se vuelve fundamental evaluar las oportunidades específicas que este vector energético puede ofrecer a sectores industriales estratégicos como la minería y la manufactura. Además, resulta crucial identificar el potencial del

Perú como exportador de hidrógeno hacia mercados internacionales. Actualmente, más de 30 economías avanzan hacia la adopción de combustibles renovables, por lo que el Perú no puede permitirse quedar rezagado.

2.2. Recurso Energético Renovable

A nivel mundial existen energías renovables que tienen un impacto realmente prometedor en la mitigación del impacto ambiental, donde muchas de las mismas, tienen cero emisiones de gases de efecto invernadero, logrando ser potentes candidatos hacia la transición energética (Deloitte, 2021).

Figura 1

Diferentes tipos de energías renovables libres en el mundo



Nota: Tomada de (Área Metropolitana Valle de Aburrá, 2023).

2.2.1. Energía Geotérmica

Representa una de las energías renovables poco conocidas en el Perú y se puede encontrar almacenada debajo de la superficie de la tierra en forma de calor y que se relaciona con aguas térmicas, volcanes, géiseres y fumarolas. Por ende, esta energía se obtiene desde dentro de la Tierra (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012).

Figura 2

Energía geotérmica en el mundo



Nota: Tomada de (TERMAS GEOMETRICAS, 2022).

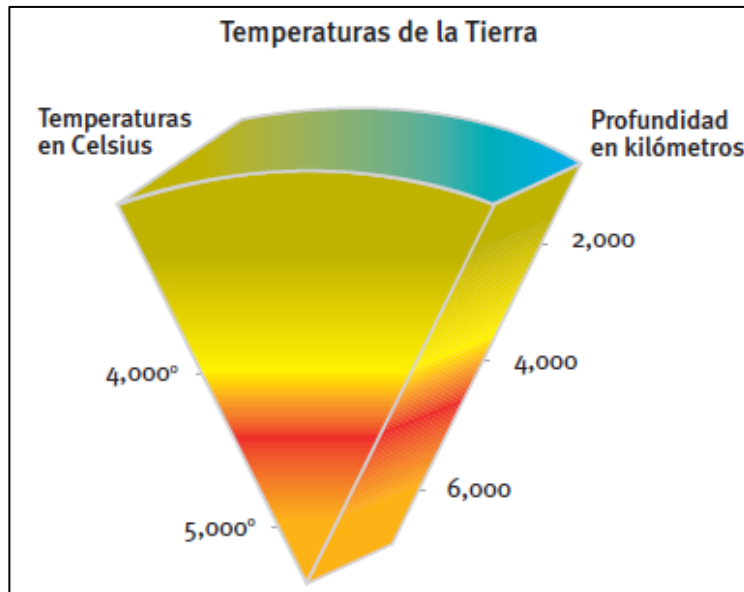
2.2.2. Flujo de calor de la Tierra y Gradiente Geotérmico

Las marcadas diferencias de temperatura entre el interior terrestre y su superficie generan un flujo constante de calor dirigido hacia el exterior. Se estima que esta transferencia térmica, que alcanza la superficie terrestre cada segundo, ocurre principalmente a través de mecanismos como la conducción y la convección (ver Figura 3) (Díaz & Guadalupe, 2021).

A escasa profundidad, ciertas características del subsuelo han podido ser identificadas en zonas específicas de la superficie terrestre. Sin embargo, los procesos y condiciones que tienen lugar en las capas más profundas del interior del planeta solo pueden inferirse mediante técnicas de observación indirecta (Cardemil, 2006).

Figura 3

Temperaturas de la Tierra de acuerdo a la profundidad



Nota: Tomada de (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010).

2.2.3. Yacimiento Geotérmico

Para que la energía geotérmica pueda ser explotada de manera económicamente viable, es imprescindible la existencia de un medio que permita el transporte del calor hacia la superficie. Por esta razón, el uso de este recurso energético está estrechamente vinculado a la presencia de una anomalía geológica conocida como reservorio o yacimiento geotérmico. Este se caracteriza por contener una acumulación de fluidos confinados bajo condiciones de alta presión litostática y elevada temperatura (Cardemil, 2006)

2.2.4. Planta geotérmica tipo Binario (Binary plants)

Este tipo de tecnología permite una extracción más eficiente de energía en yacimientos geotérmicos de temperatura media (entre 100 y 150 °C) y en recursos con alta salinidad, en comparación con las plantas de tipo flash. Además, presenta un menor impacto ambiental al evitar la emisión de gases a la atmósfera. Su principio de funcionamiento se basa en no utilizar directamente el fluido geotérmico, sino en transferir su energía térmica a un fluido secundario. Cuando el recurso geotérmico posee una entalpía elevada (superior a 200 kCal/kg), es posible emplear agua como fluido de trabajo. Sin

embargo, en el caso de yacimientos de menor entalpía, se recurre a fluidos con propiedades termodinámicas más favorables (bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a temperaturas elevadas) aunque en dichas situaciones, es común utilizar mezclas de hidrocarburos altamente volátiles, como propano, n-butano, isobutano o isopentano (Díaz & Guadalupe, 2021).

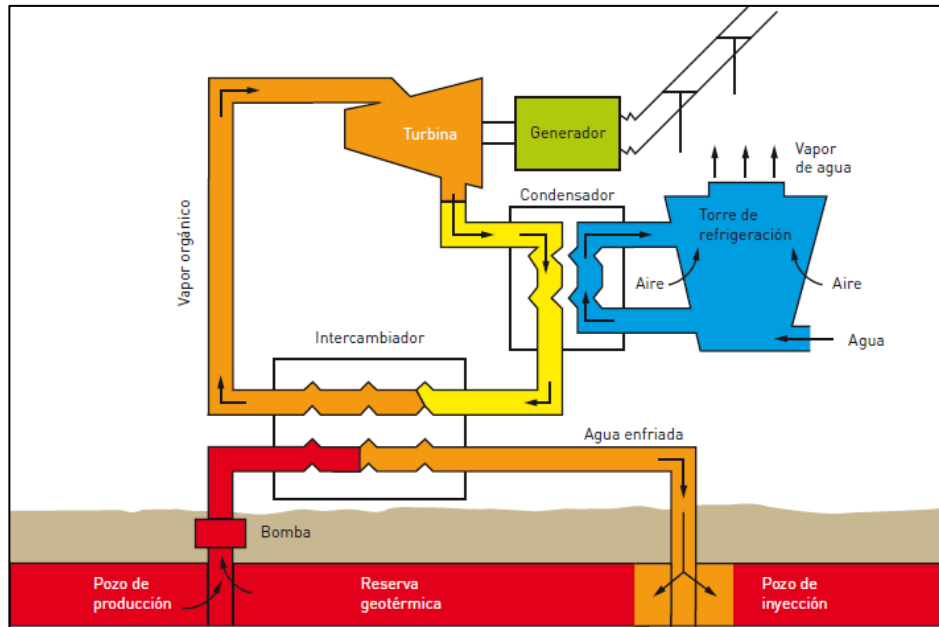
Los avances tecnológicos alcanzados durante las décadas de 1980 y 1990 han representado un progreso significativo en la generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos de baja temperatura. Como resultado, en la actualidad es posible operar plantas geotérmicas que aprovechan recursos térmicos con temperaturas que oscilan entre los 75 °C y los 180 °C (Díaz & Guadalupe, 2021).

Mediante un intercambiador de calor, el fluido geotérmico (ya sea agua caliente, vapor o una combinación de ambos) transfiere su energía térmica al fluido de trabajo o secundario, el cual se calienta hasta alcanzar su punto de vaporización (Díaz & Guadalupe, 2021).

El vapor generado se utiliza para accionar una turbina, tras lo cual se condensa mediante un sistema de enfriamiento (por aire o por agua) y posteriormente se recircula hacia el intercambiador de calor, donde el ciclo se repite al volver a vaporizarse. De este modo, el fluido secundario opera dentro de un sistema de circuito cerrado y es importante destacar que los fluidos geotérmicos no entran en contacto con la atmósfera en ningún momento del proceso, ya que son reinyectados directamente en el yacimiento geotérmico. En las plantas de ciclo binario que utilizan refrigeración por aire, el agua geotermal no llega a vaporizarse, lo cual permite su reinyección total al reservorio, donde dicha característica, además de reducir al mínimo las ya bajas emisiones, contribuye a mantener la presión del yacimiento, prolongando así la vida útil del proyecto (Díaz & Guadalupe, 2021).

Figura 4

Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario



Nota: Tomada de (Sanchez Guzmán et al., 2011).

2.2.5. Energía geotérmica a nivel mundial

En el 2018, la producción de corriente eléctrica mediante el uso de energía geotérmica fue de 130 000 MW, en relación con 2017 que fue de 121 000 MW, se tuvo un crecimiento de 6.5%. En el mundo se tiene una potencia en energía geotérmica de aproximadamente 70 000 a 80 000 MW. Aunque solo el 15% de dicho potencial es empleado para producir energía eléctrica, siendo apenas de 13 000 MW. En el 2018 se obtuvo una producción en capacidad instalada en el mundo fue de más de 14 GW (Banco Mundial, 2017).

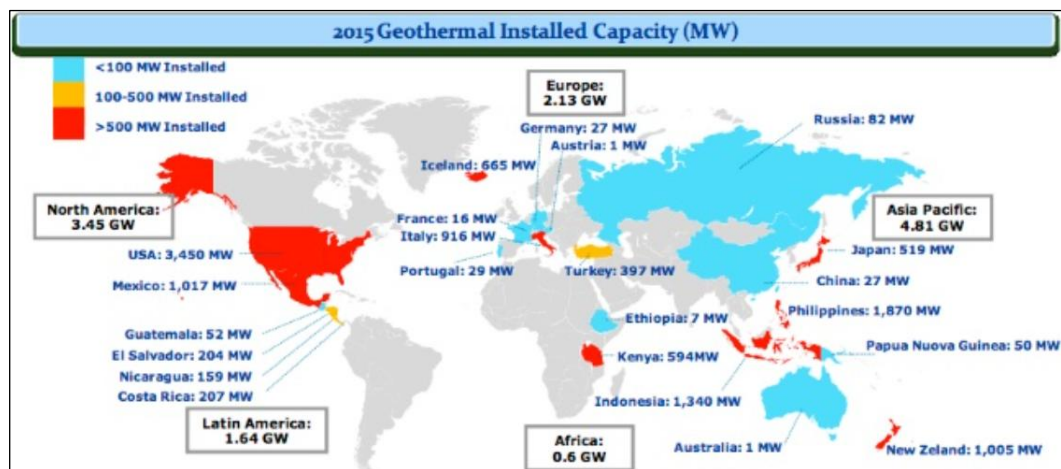
Se llevó a cabo un estudio utilizando parámetros de ubicación específicos para la ciudad de Ginebra, Suiza, en un contexto en el que países como Pakistán y Etiopía comenzaron a incorporar la energía geotérmica dentro de su matriz energética. En el caso de Ginebra, la fuente geotérmica identificada corresponde a un sistema hidrotermal subterráneo (Younas et al., 2016).

Por su parte, Turquía y la región de la península de Biga presentaron un notable potencial geotérmico con aplicaciones en diversos sectores. No obstante, persiste cierta preocupación debido al limitado conocimiento existente sobre los posibles impactos ambientales derivados de su aprovechamiento (Çetiner et al., 2016).

Por otro lado, en varios países europeos como Italia, Hungría, Polonia, Macedonia, Serbia, Eslovaquia y Rumania, la adopción de fuentes de energía renovable ha sido respaldada públicamente y la energía geotérmica continúa teniendo una presencia significativa. Esta forma de energía es considerada tanto viable como socialmente aceptada en dichos contextos (Kępińska & Kasztelewicz, 2015).

Figura 5

Capacidad instalada de energía geotérmica en MW en 2015



Nota: Tomada de (Geotermia Online, 2015).

A finales del 2019, la capacidad instalada geotérmica en el mundo logró llegar a 15.406 GW. Agregándose alrededor de 759 MW de potencia, logrando ser uno de los mayores crecimientos anuales en las últimas dos décadas. De la Se llevó a cabo un estudio utilizando parámetros de ubicación específicos para la ciudad de Ginebra, Suiza, en un contexto en el que países como Pakistán y Etiopía comenzaron a incorporar la energía geotérmica dentro de su matriz energética. En el caso de Ginebra, la fuente geotérmica identificada corresponde a un sistema hidrotermal subterráneo (Younas et al., 2016).

Por su parte, Turquía y la región de la península de Biga presentaron un notable potencial geotérmico con aplicaciones en diversos sectores. No obstante, persiste cierta preocupación debido al limitado conocimiento existente sobre los posibles impactos ambientales derivados de su aprovechamiento (Çetiner et al., 2016).

Por otro lado, en varios países europeos como Italia, Hungría, Polonia, Macedonia, Serbia, Eslovaquia y Rumania, la adopción de fuentes de energía renovable ha sido respaldada públicamente y la energía geotérmica

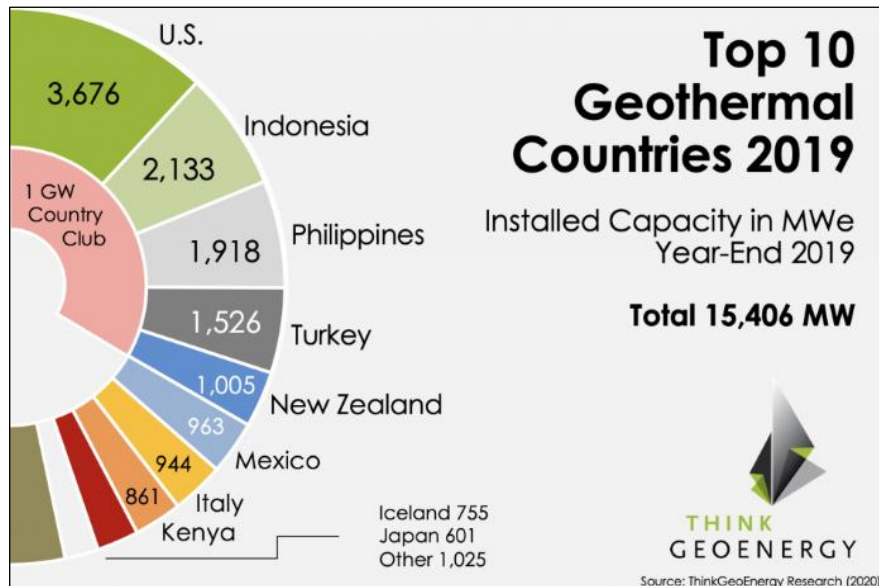
continúa teniendo una presencia significativa. Esta forma de energía es considerada tanto viable como socialmente aceptada en dichos contextos (Kępińska & Kasztelewicz, 2015).

Figura 5 se puede decir que entre los diez países con mayor potencial geotérmico en el 2018 son:

- Estados Unidos posee un potencial de 3.676 GW, con un adicional de 23 MW añadidos al final de año.
- Indonesia con 2.133 GW, con un adicional de 185 MW para dicho año.
- Filipinas con una capacidad de 1.918 GW.
- Turquía con un potencial de 1.526 GW, con un agregado de 179 MW en el 2019.
- Nueva Zelanda con una potencia instalada de 1.005 GW.
- México con una potencia de 962.7 MW, con un adicional de 27 MW, aunque con un crecimiento neto de 11.7 MW originados por la capacidad no operativa.
- Italia posee una capacidad de 944 MW.
- Islandia tiene una potencia de 755 MW, con un agregado de 5 MW que reemplazó a la antigua central de 3 MW.
- Kenia tiene 861 MW, con un adicional de 193.3 MW, siendo uno de los mayores aumentos para dicho año.
- Japón posee 601 MW, con un desarrollo constante en una escala pequeña y con un agregado más grande, con un total de 51.6 MW.

Figura 6

Los 10 países con la mayor potencia instalada en energía geotérmica



Nota: Tomada de (Jorquera, 2020).

2.2.6. Ventajas y desventajas de la energía geotérmica

De acuerdo con Siber (2016) se pueden destacar entre sus ventajas:

- Costo bajo además de que no involucra riesgos producto de la extracción.
- Puede emplearse en cualquier punto de la corteza terrestre reduciendo notablemente la dependencia energética del exterior en varios países.
- Los contaminantes que se generan son realmente mínimos en función con los producidos por otros tipos de fuentes de energía como petróleo y carbón.

Entre sus desventajas más importantes se tienen:

- Emite ácido sulfhídrico y dióxido de carbono aunque en pequeñas cantidades en función del suministro de energía.
- Posee el potencial de contaminar fuentes fluviales que se encuentren cercanas con sustancias como amoníaco y arsénico.
- Su construcción genera un impacto alto en el aspecto visual del paisaje.
- No es posible su transporte.

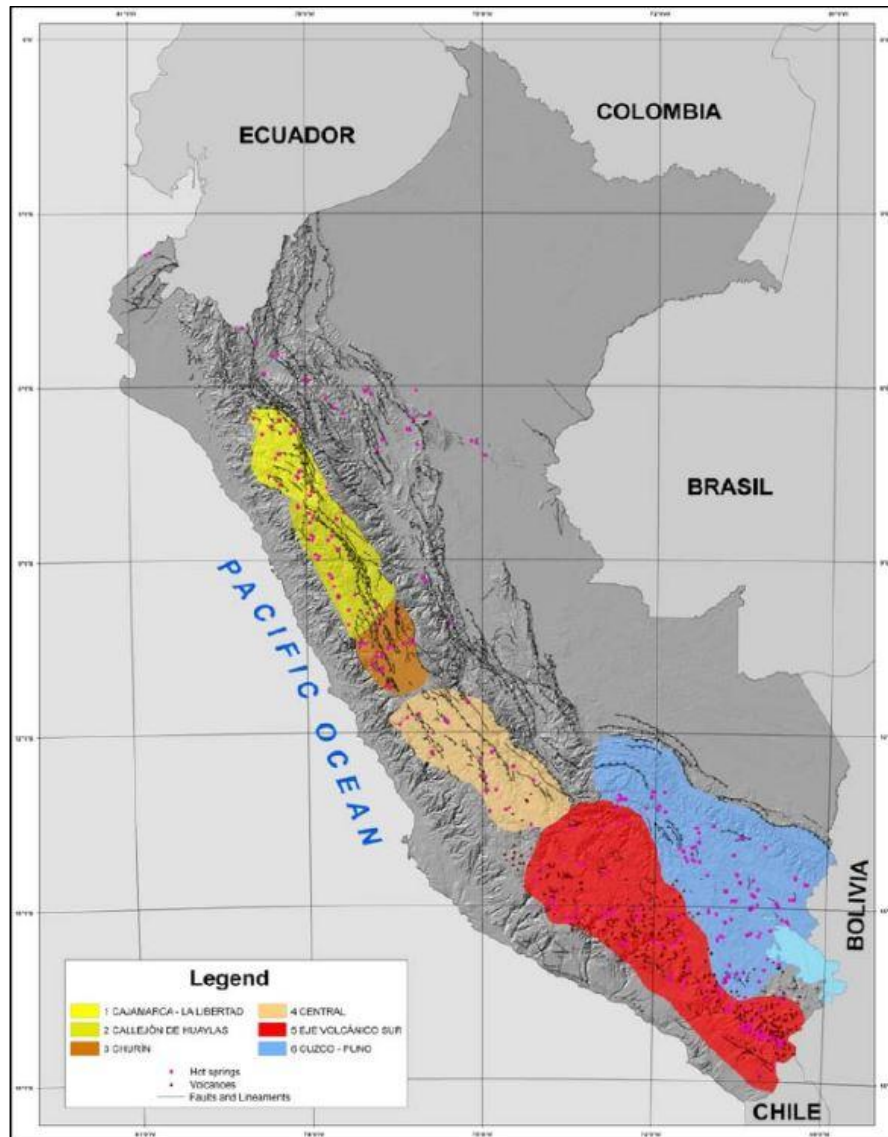
2.2.7. Energía geotérmica en el Perú

Se puede decir que, en Perú, se ha creado un marco normativo que busca apoyar que se agreguen nuevas plantas de producción de electricidad mediante el uso de la geotermia, adicionalmente, ya se ha realizado un Plan Maestro que incentiva el desarrollo de la energía geotérmica. Del plan mencionado, se tienen 61 regiones que tienen un enorme potencial para desarrollo, se ha calculado que se puede generar 3 GW de capacidad instalada para generación de energía eléctrica empleando energía geotérmica, donde aproximadamente la mitad de dichas regiones se encuentran en la zona sur del Perú (Deloitte, 2021).

Atender el incremento sostenido de la demanda eléctrica sin comprometer la sostenibilidad ambiental representa uno de los desafíos más relevantes para los Estados. En Perú, este reto se presenta en un contexto favorable, dado que el país dispone de una amplia variedad de fuentes de energía renovable, entre las cuales la energía geotérmica destaca por su elevado potencial, ya que más del 50 % de este recurso se concentra en la zona sur del territorio nacional, lo que constituye una ventaja comparativa de origen natural que aún no ha sido debidamente explotada (Díaz & Guadalupe, 2021). Para minimizar los posibles impactos ambientales asociados al desarrollo de este tipo de proyectos, es recomendable seleccionar áreas con baja densidad poblacional como emplazamiento para las instalaciones geotérmicas (Meier et al., 2015).

Figura 7

Mapa del Perú y su potencial geotérmico



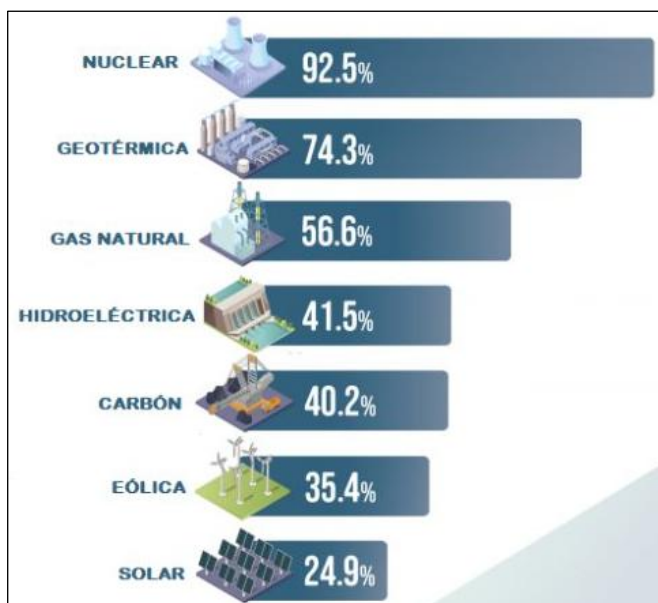
Nota: Tomada de (Díaz & Guadalupe, 2021).

2.2.8. Factor de capacidad para varias fuentes de energía

De acuerdo con World Energy Trade (2021), el factor de capacidad por cada tipo de fuente de energía para el 2020 considerando a la nuclear con 92.5%, seguidamente por la geotérmica con 74.3%, gas natural con 56.6%, hidroeléctrica con 41.5%, carbón con 40.2%, eólica con 35.4% y solar con 24.9%; aunque cabe precisar que la energía nuclear posee un enorme potencial para generar electricidad, conlleva múltiples riesgos en caso de ocurrir una falla, pero se puede ver que la energía geotérmica ocupa el segundo lugar, demostrando que es un tipo de fuente energética con un potencial bastante elevado para poder emplearse en la generación de energía eléctrica. En la Figura 8 se puede observar dichos datos.

Figura 8

Factor de capacidad por tipo de energía para 2020



Nota: Tomada de (World Energy Trade, 2021).

2.2.9. Costo nivelado de la electricidad (LCOE)

En toda tecnología, los costos originados por la inversión para generar energía eléctrica tienen una variación que depende del factor de capacidad, capacidad instalada y del tipo de tecnología empleado. En la Tabla 1 se puede apreciar los costos nivelados de la electricidad para el 2017-2018, donde se puede ver que para la geotérmica y eólica, los costos casi no se han reducido.

Tabla 1

Comparación de costos nivelados de la electricidad

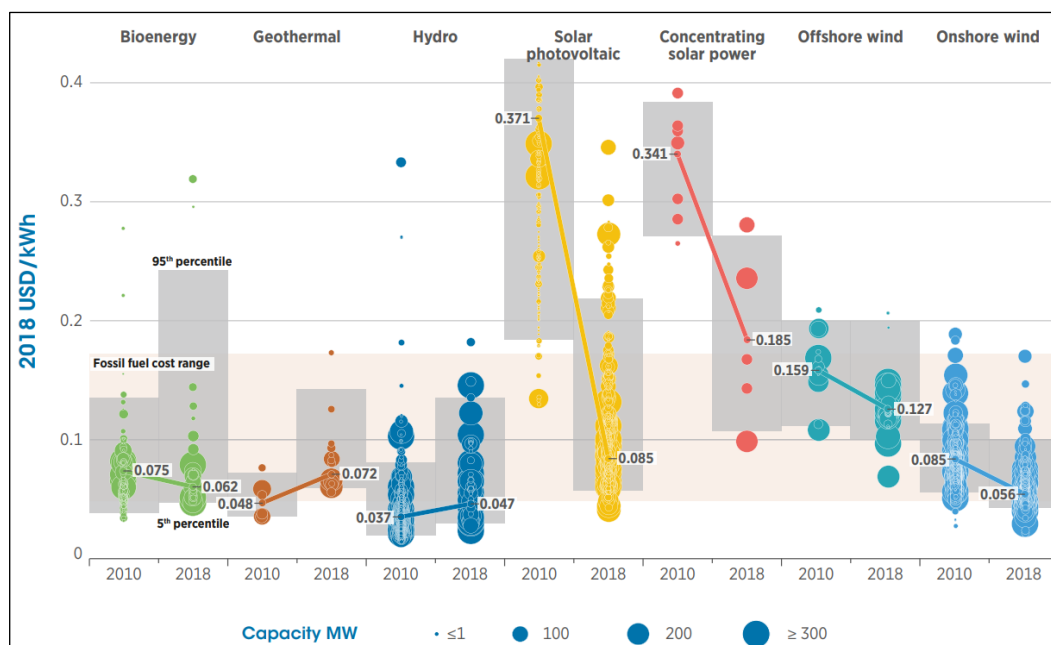
	LCOE global	Costos de Electricidad: percentiles 5to a 95to	Cambio en LCOE 2017-2018
	USD/kWh	USD/kWh	
Bioenergías	0,062	0,048 - 0,243	-14%
Geotermia	0,072	0,060 - 0,143	-1%
Hidro	0,047	0,030 - 0,136	-11%
Solar Fotovoltaica	0,085	0,058 - 0,219	-13%
Solar Concentrada	0,185	0,109 - 0,272	-26%
Eólica offshore	0,127	0,102 - 0,198	-1%
Eólica onshore	0,056	0,044 - 0,100	-13%

Nota: Tomada de (IRENA, 2019).

Aunque, de acuerdo con la información de la Figura 9, el LCOE para las centrales geotérmicas se mantuvo competitivo en relación con otras tecnologías de energías renovables y de los combustibles del tipo fósil (IRENA, 2019).

Figura 9

Costo nivelado global de tecnologías de producción de energía renovable a gran escala



Nota: Tomada de (IRENA, 2019).

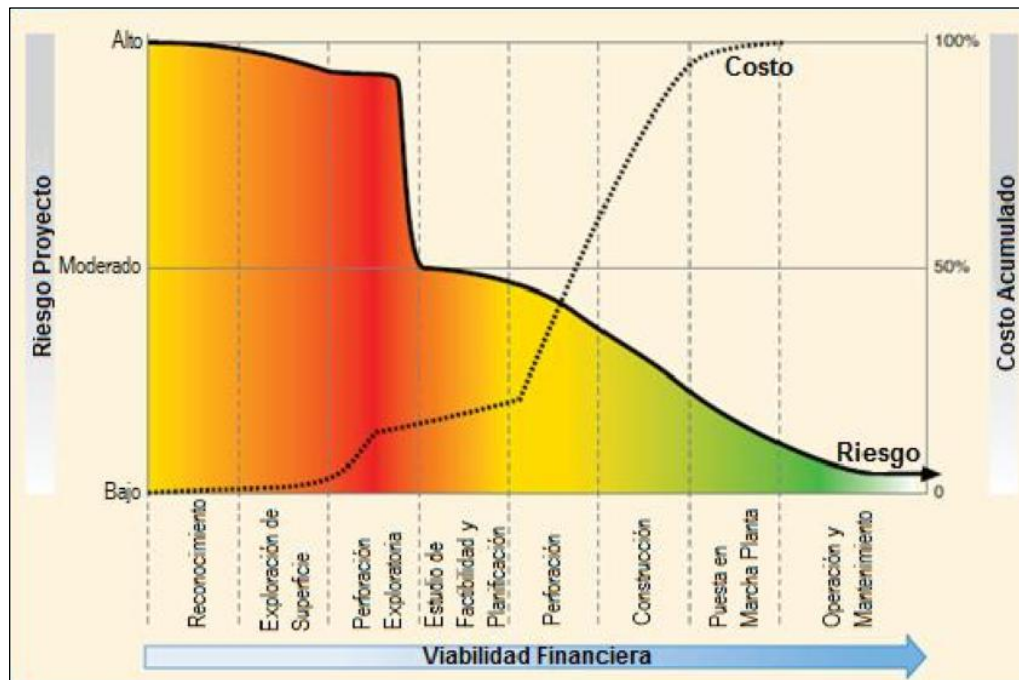
2.2.10. Costos y riesgos de un proyecto con energía geotérmica

De la Figura 10, se puede observar un riesgo es alto cuando se está en la etapa de reconocimiento, reduciéndose un poco el riesgo en la etapa de exploración de superficie, esto se explica debido a que la probabilidad de encontrar un pozo con potencial bajo es relativamente alta, generando pérdida, en la etapa de perforación exploratoria, el riesgo es menor a las etapas anteriores pero considerando que igualmente existe una probabilidad alta de encontrar un pozo seco, seguidamente, en la etapa de estudio de factibilidad y planificación el riesgo es moderado, reduciéndose considerablemente, ya que se conoce con exactitud el potencial de los pozos y ya se tiene la información correcta para empezar con el proyecto de la central geotérmica, en la etapa de perforación y construcción el riesgo

se reduce aún más, donde finalmente para la etapa de puesta en marcha y operación y mantenimiento el riesgo es bajo.

Figura 10

Costos y riesgos en un proyecto de energía geotérmica en desarrollo



Nota: Tomada de (Bona & Coviello, 2016).

2.3. Hidrógeno

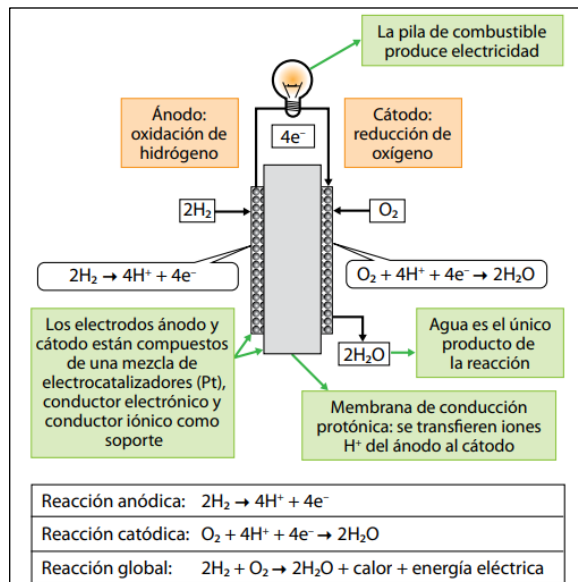
El hidrógeno, en su forma más estable y prevalente, está constituido por un protón y un electrón, aunque existen dos isótopos adicionales: el deuterio, que contiene un protón, un neutrón y un electrón, y el tritio, compuesto por un protón, dos neutrones y un electrón. De estos, el isótopo más común (conocido como protio o simplemente H) representa el 99.9885 % del hidrógeno presente en la naturaleza, mientras que el resto corresponde al deuterio. Esto implica que, por cada átomo de deuterio, existen aproximadamente 8694 átomos de protio. El tritio, por su parte, no se incluye en estas proporciones debido a que no se encuentra de forma natural, sino que es generado artificialmente por el ser humano (Suárez, 2019). La Asociación Española del Hidrógeno (2018) menciona que por cada kilogramo de hidrógeno, se pueden obtener 100 km de recorrido para un auto que use dicho tipo de combustible.

2.3.1. Historia

Poco tiempo después del Big Bang, la combinación de protones y electrones dio origen principalmente a átomos de hidrógeno, así como a una menor proporción de helio y como resultado de este proceso primordial, el hidrógeno se convirtió en el elemento más abundante del universo. Se estima que representa aproximadamente el 90 % del total de átomos existentes y cerca del 75 % del contenido de masa a escala universal (Suárez, 2019).

Figura 11

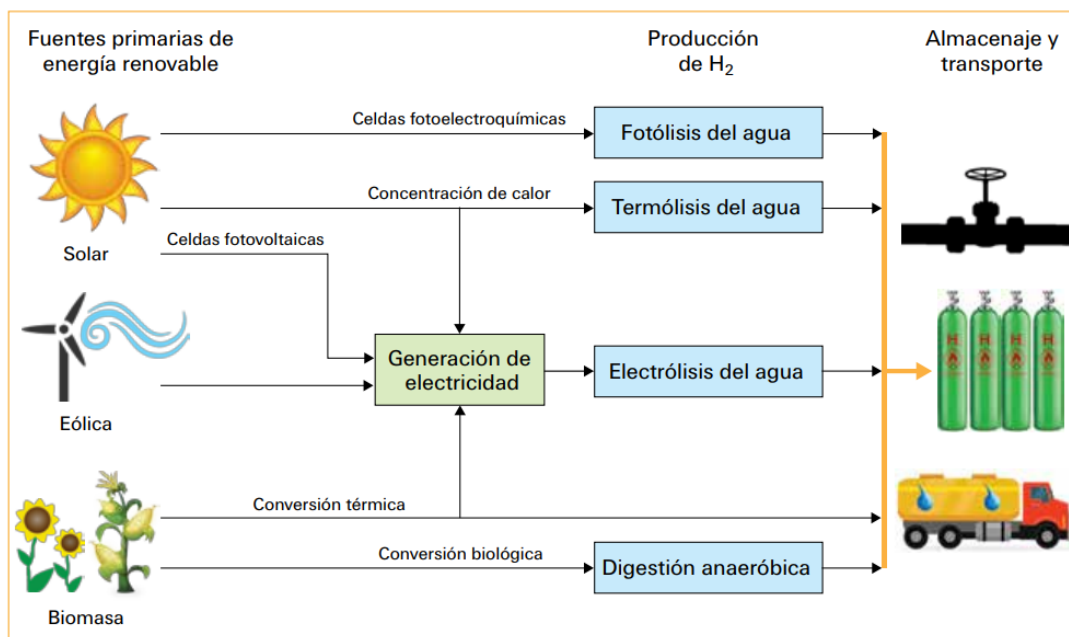
Principio de operación de una pila de combustible tipo MIP con hidrógeno



Nota: Tomada de (Suárez, 2019).

Figura 12

Producción sostenible de Hidrógeno



Nota: Tomada de (Suárez, 2019).

Gracias a su versatilidad química, el hidrógeno posee una amplia gama de aplicaciones en el ámbito industrial, destacándose su uso como reactivo en la síntesis de fertilizantes, plásticos y productos farmacéuticos. En el caso de México, la principal empresa consumidora de hidrógeno ha sido Petróleos Mexicanos (Pemex), que lo emplea principalmente en procesos de refinación de combustibles. Asimismo, Pemex ha sido históricamente el mayor productor de hidrógeno en el país, aunque esta situación comenzó a cambiar a partir de febrero de 2017, cuando se anunció que la empresa Air Liquide México asumiría el suministro de hidrógeno y la operación de una planta ya existente ubicada en Tula, Hidalgo. Actualmente, el método de producción más utilizado es la reformación catalítica (Suárez, 2019).

2.3.2. Propiedades fisicoquímicas

Si bien las propiedades fisicoquímicas del hidrógeno no lo convierten en un candidato ideal para una integración simple, directa y a gran escala en la economía actual, los beneficios potenciales asociados a su uso son lo suficientemente relevantes como para justificar su inclusión estratégica en la cadena de valor. Esto, por supuesto, requiere la implementación rigurosa de medidas de seguridad adecuadas (Morante et al., 2020). Entre sus ventajas

más relevantes se tiene:

- El hidrógeno es el único combustible cuya utilización no produce emisiones de dióxido de carbono, ya que su reacción con el oxígeno genera exclusivamente vapor de agua como subproducto.
- Se considera una fuente energética renovable e inagotable, dada su abundancia y la posibilidad de ser regenerado continuamente mediante diversos procesos.
- Presenta ventajas en términos de almacenamiento físico, ya que puede conservarse de forma relativamente sencilla, ya sea como gas comprimido o en estado líquido.

Estas características distintivas resaltan la importancia de abordar y superar los desafíos actuales, con el objetivo de establecer una economía sustentada en el uso de hidrógeno renovable.

2.3.3. Propiedades con respecto al gas natural

El hidrógeno presenta una densidad significativamente menor que el gas natural (entre 6 y 10 veces inferior), lo que implica que se requiere un mayor volumen para almacenar una misma cantidad de masa, pero en términos energéticos, una cantidad equivalente en masa de hidrógeno proporciona aproximadamente el doble de energía que el gas natural. Como consecuencia de estas dos propiedades, se estima que el hidrógeno necesita alrededor de tres veces más volumen que el gas natural para generar una cantidad equivalente de calor. En caso de que se opte por su almacenamiento o transporte en estado líquido, es necesario considerar que su punto de ebullición es extremadamente bajo ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo cual plantea desafíos tecnológicos y energéticos considerables, además, en lo que respecta al índice de Wobbe (parámetro que evalúa el comportamiento de combustión en quemadores), el valor del hidrógeno es ligeramente inferior al del gas natural y por estas razones, no es posible sustituir directamente uno por otro sin realizar adaptaciones en los sistemas de aplicación (Morante et al., 2020).

Tabla 2

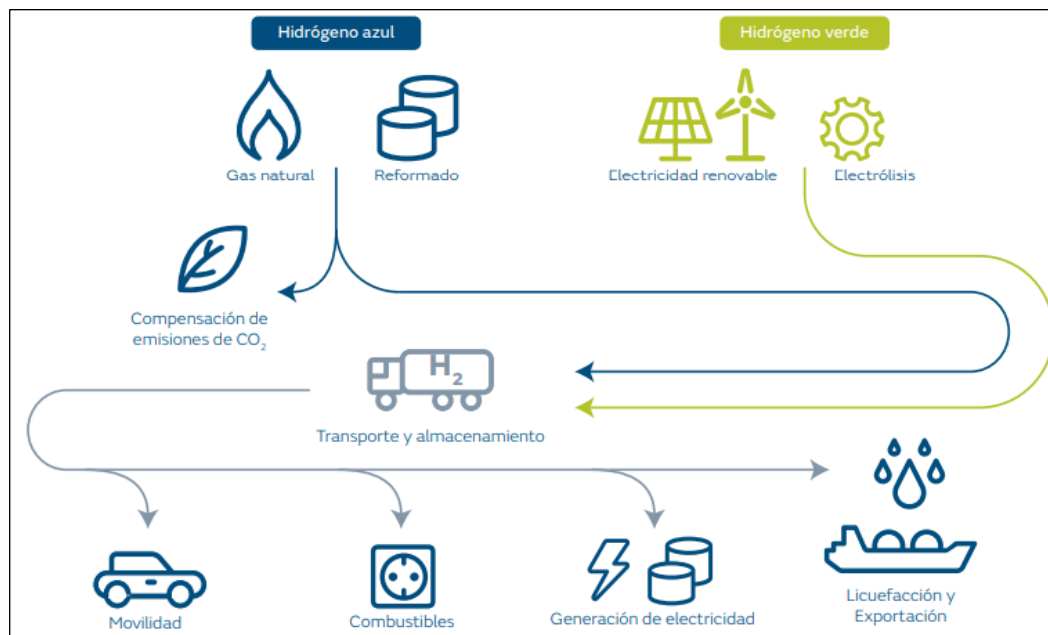
Propiedades físicas del hidrógeno y del GN

Propiedad	Hidrógeno	Respecto al gas natural
Densidad (gas)	0.089 kg/m ³ (0 °C, 1bar)	1/10
Densidad (líquido)	70,79 kg/m ³ (-253 °C, 1bar)	1/6
Punto ebullición	-253°C (1 bar)	-90 °C
Densidad energética (masa)	120 MJ/kg	x2
Densidad energética (volumen)	10,8 MJ/Nm ³	1/3
Índice de Wobbe	11,29 kWh/Nm ³	5/6

Nota: Tomada de (Morante et al., 2020).

Figura 13

Fuentes y método de generar hidrógeno



Nota: Tomada de (Morante et al., 2020).

2.3.4. Contenido de energía del H

El poder calorífico representa la cantidad de energía que puede liberar una unidad de masa de un material cuando se produce una reacción de oxidación química. Este valor equivale a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas del combustible, menos la energía requerida para la formación de las nuevas moléculas generadas durante la combustión. Para el caso del hidrógeno, su poder calorífico superior (PCS) es de 141,86 kJ/g, mientras que su poder calorífico inferior (PCI) alcanza los 119,93 kJ/g, ambos medidos a 25 °C y 1 atm. Debido a que el hidrógeno

es el elemento más liviano y carece de átomos de carbono pesado, presenta la mayor relación energía–peso entre todos los combustibles conocidos. Esta característica ha motivado su uso extensivo en programas espaciales, donde la reducción de peso es un factor determinante y además, la energía liberada durante su combustión es aproximadamente 2.5 veces mayor que la generada por los hidrocarburos convencionales, como la gasolina, el diésel, el metano o el propano (Gámez, 2010).

2.3.5. Densidad de energía

La densidad energética se refiere a la cantidad de energía contenida en un volumen específico de combustible y este valor se obtiene como resultado del producto entre el poder calorífico inferior (PCI) y la densidad del combustible en cuestión (Gámez, 2010).

Tabla 3

Densidades de energía para diferentes combustibles importantes

COMBUSTIBLE	DENSIDAD DE ENERGÍA (PCI)	ESTADO
HIDRÓGENO	10.050 kJ/M ³	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	1.825.000 kJ/M ³	GAS A 200 BAR _G Y 15 °C
	4.500.000 kJ/M ³	GAS A 690 BAR _G Y 15 °C
	8.491.000 kJ/M ³	LÍQUIDO
METANO	32.560 kJ/M ³	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	6.860.300 kJ/M ³	GAS A 200 BAR _G Y 15 °C
	20.920.400 kJ/M ³	LÍQUIDO
PROPANO	86.670 kJ/M ³	GAS A 1 ATM Y 15 °C
	23.488.400 kJ/M ³	LÍQUIDO
GASOLINA	31.150.000 kJ/M ³	LÍQUIDO
DIÉSEL	31.435.800 kJ/M ³	LÍQUIDO
METANOL	15.800.100 kJ/M ³	LÍQUIDO
ETANOL	21.100.000 kJ/M ³	LÍQUIDO

Nota: Tomada de (Dicks & Rand, 2018).

2.3.6. Ventajas y desventajas del hidrógeno

Nabalia (2021) expone entre sus ventajas lo siguiente:

- Es abundante, prácticamente inagotable.
- No es tóxico, por ello se le considera como fuente energética limpia.
- No emite gases de efecto invernadero, es decir, es cero emisiones al ser quemado, por ello, se le llama el combustible del futuro.

- Su combustión genera agua como un subproducto, que al compararse con otros combustibles que producen dióxido de carbono.

Entre sus desventajas se tienen:

- Su almacenamiento no es tan sencillo.
- Al poseer una densidad demasiado baja, se necesitan tanques de gran tamaño para poder almacenar la misma cantidad de masa.
- El costo de generar hidrógeno es alto, debido al proceso usado para su producción, llamado electrólisis.

Figura 14

Hidrógeno en el ambiente



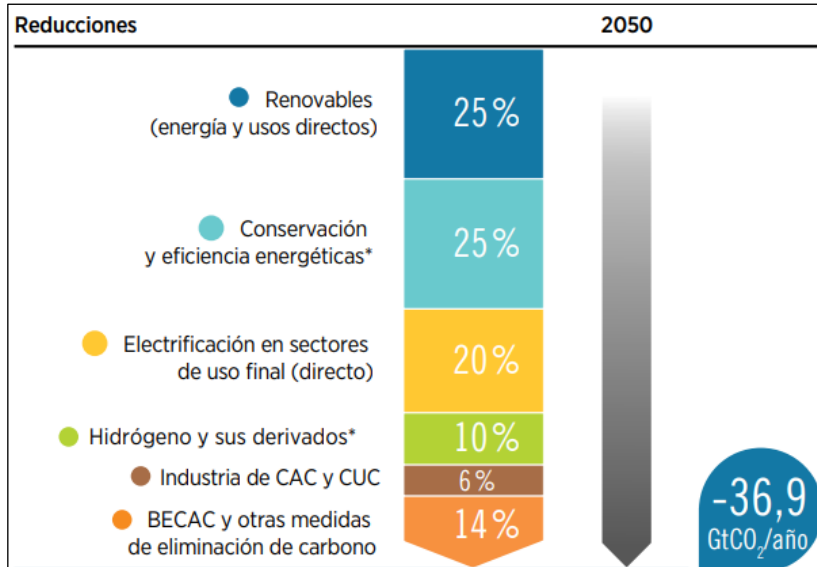
Nota: Tomada de (Nabalia, 2021).

2.4. Transición energética

En el informe elaborado por IRENA (2021) que no menos del 80% de los habitantes en el mundo, habitan en países que importan netamente combustibles del tipo fósil para sus actividades. Adicionalmente, para el 2050, la energía eléctrica vendrá a ser el proveedor principal de energía, dando un paso del 21% del consumo total energético en el mundo en 2018, a más del 50% para dicho año. El uso de hidrógeno y sus subproductos derivados tendrán una participación del 12% en relación de la energía para el 2050.

Figura 15

Reducción de emisiones de carbono para el escenario de 1.5°C en porcentaje



Nota: Tomada de (IRENA, 2021).

2.5. Análisis de rentabilidad

Según García et al. (2021), resulta fundamental realizar un análisis detallado de los indicadores de rentabilidad en cualquier proyecto, con el fin de evaluar su viabilidad económica y sostenibilidad a lo largo del tiempo. Entre los principales indicadores utilizados se encuentran el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el periodo de recuperación de la inversión (Tr) y la relación beneficio-costos (B/C).

Por su parte, Daniels et al. (2019) señalan que para calcular la relación beneficio-costos (B/C), debe aplicarse la siguiente fórmula:

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

Donde:

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

Según Kousky et al. (2019), el retorno sobre la inversión (ROI, por sus siglas en inglés) puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

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

2.6. Definición conceptual de la terminología empleada

Costo nivelado de energía:

Representa un costo medido por unidad de producción que se determina para poder hacer una comparación de producción entre distintas tecnologías.

Costos:

Llamado coste, viene a ser el desembolso económico que se efectúa para la generación de un bien o de la oferta de un servicio.

Eficiencia energética:

Se define como la optimización del consumo de la energía disponible para lograr niveles específicos de servicio y confort.

Energía Geotérmica:

Fuente de energía renovable no convencional que utiliza el calor almacenado en el subsuelo terrestre para la producción de energía eléctrica.

Ciclo Rankine:

Proceso termodinámico orientado a transformar energía térmica en trabajo mecánico, utilizando vapor de agua como fluido de trabajo e impulsando turbinas para la generación de energía.

Ciclo binario o Rankine Orgánico:

Ciclo termodinámico de generación de vapor que emplea un fluido orgánico de alta masa molecular, el cual experimenta un cambio de fase de líquido a vapor a temperaturas significativamente inferiores a las requeridas para la vaporización del agua.

Entalpia:

Se trata de una magnitud termodinámica representada por la letra H, cuya variación indica la cantidad de energía que un sistema termodinámico transfiere a su entorno, ya sea en forma de absorción o cesión de energía.

Gases efecto invernadero:

Son aquellos elementos gaseosos del ambiente, naturales y como resultado de las actividades humanas, que tienden a absorber y emitir radiación infrarroja.

Hidrógeno:

El hidrógeno es el elemento químico más simple y uno de los más abundantes del planeta; no obstante, no se encuentra de forma libre en la Tierra, sino combinado con otros elementos, como el oxígeno (formando agua) o el carbono (formando hidrocarburos). Su presencia en compuestos es resultado de las condiciones geoquímicas del planeta, las cuales están influenciadas por procesos geológicos como la subducción, fenómeno en el que una placa litosférica oceánica se hunde por debajo de otra placa, ya sea oceánica o continental, generando zonas de alta presión y temperatura que favorecen diversas transformaciones químicas y estructurales en el interior de la Tierra.

Impacto ambiental:

Alteración del ecosistema o ambiente, que puede ser provocada de manera directa e indirecta por una actividad o proyecto en una región específica, en otras palabras, viene a ser la modificación del medio ambiente originada por la mano del ser humano o la misma naturaleza.

Pila de combustible de hidrógeno:

Dispositivo o elemento electroquímico que convierte de manera directa la energía química en electricidad. Se origina de un combustible, por lo general es hidrógeno, y de un comburente, generalmente es el oxígeno, para generar agua y energía eléctrica en forma de corriente continua y calor.

Transición energética:

Son los diferentes cambios que se deben realizar en los modelos industriales

de producción, distribución y consumo energético para eludir los efectos de la contaminación de gases efecto invernadero.

CAPÍTULO III : MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación empleada fue aplicada, ya que se hizo uso de diferentes conceptos referentes a la ingeniería mecánica y eléctrica, es especial, con respecto a los diferentes tipos de energías renovables, enfocándose en la energía geotérmica e hidrógeno.

El diseño de investigación usado fue no experimental, porque las variables no se manipularon ni se modificaron, sino que fueron empleadas conforme se encontraron en su contexto para su posterior análisis.

3.2. Población y muestra

La población viene a ser el hidrógeno y energía geotérmica disponible en el Perú.

La muestra será igual a la población, ya que el análisis abarcará todo el potencial que pueden contener ambos tipos de energías renovables para lograr la transición energética.

3.3. Hipótesis

La transición energética en el Perú se podrá lograr en el largo plazo empleando al hidrógeno y energía geotérmica como energías renovables.

3.4. Variables – Operacionalización

- **Variable independiente:**

Hidrógeno y energía geotérmica.

- **Variable dependiente:**

Transición energética.

Tabla 4

Cuadro de Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Dependiente Transición energética	Las transiciones energéticas sostenibles se conciben aquí como procesos sociotécnicos complejos de descarbonización dentro de los sistemas energéticos, e implican tanto la incorporación de energía con bajo contenido de carbono o cero como la eliminación gradual de la energía antigua con alto contenido de carbono (IRENA, 2019).	Se logra desarrollar mediante la propuesta de una metodología para lograr la transición energética para mitigar el impacto ambiental en el largo plazo.	Eficiencia energética	- Consumo de energía - Emisiones de CO2	De razón
			Mitigación del Impacto Ambiental	- Reducción de gases de efecto de invernadero - Sostenibilidad energética	
Independiente Hidrógeno y energía geotérmica	El hidrógeno, considerado el elemento más simple desde el punto de vista atómico, es también uno de los más abundantes en el planeta. Sin embargo, no se encuentra en estado libre en la Tierra, es decir, como gas molecular, sino que aparece formando compuestos con diversos elementos. Entre sus combinaciones más comunes se encuentran el agua, al unirse con oxígeno, y los hidrocarburos, al asociarse con carbono, entre otras posibles asociaciones químicas (Fernández, 2022). La energía geotérmica es aquella fuente de energía donde el calor proviene del subsuelo o del interior de la corteza terrestre (Westreicher, 2022).	Se establecen a partir del análisis de diversos artículos científicos, investigaciones, informes técnicos, tesis y otros documentos relevantes, con el objetivo de identificar y evaluar el potencial existente para viabilizar la transición energética en el Perú.	Poder energético	- Aporte de energía	De razón
			Costos	- Costo de producción - Costos de Operación y mantenimiento	
			Rendimiento productivo	- Eficiencia de producción - Rendimiento de transformación	

Nota: Elaboración propia.

3.5. Métodos y técnicas de investigación

3.5.1. Técnicas de investigación

Revisión bibliográfica

Esta metodología permitió analizar en profundidad las características de la energía geotérmica y del hidrógeno, abordando aspectos como sus propiedades, beneficios, limitaciones, potencial energético y métodos de producción. Para ello, se realizó una revisión y análisis de literatura científica disponible en revistas indexadas de alto impacto, accesibles a través de bases de datos como Scopus y Google Académico.

Análisis de documentos

Esta técnica resultó fundamental para recopilar la información preliminar necesaria para el adecuado desarrollo de la presente investigación sobre energía geotérmica e hidrógeno. Asimismo, permitió reunir datos relevantes y pertinentes relacionados con estudios previos, conceptos clave, teorías y definiciones vinculadas a la temática abordada.

3.6. Descripción de los instrumentos utilizados

En la Tabla 5 se puede observar la descripción de los instrumentos utilizados.

Tabla 5

Instrumentos utilizados

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Observación	Cuaderno de apuntes, fichas de campo.
Análisis de documentos	Revistas, páginas web de internet, Libros, tesis

Nota: Elaboración propia.

3.7. Análisis estadístico e interpretación de los datos

Los datos obtenidos de la presente investigación fueron procesados de manera manual y a la vez utilizando programas de computadora como son Microsoft Excel, Word. Donde al final se presentan los datos en tablas y gráficos para poder dar un mejor panorama sobre la metodología que se debe emplear para lograr la transición energética en el Perú, explicando cada uno de los mencionados para una mejor comprensión de la situación energética

en el país y así poder determinar la mejor alternativa para lograr la tan ansiada transición energética en el largo plazo.

CAPÍTULO IV : PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Para poder realizar el análisis sobre el uso de la energía geotérmica para generar hidrógeno con el propósito de lograr la transición energética en el Perú, se procedió a recopilar información sobre el hidrógeno y de la energía geotérmica disponible en el territorio peruano, para poder determinar qué tanto de hidrógeno se podría producir analizando al menos una planta de 100 MW de potencia eléctrica que empleando un catalizador de la misma potencia, pueda generar hidrógeno y oxígeno que posteriormente, puede ser vendido, obteniendo ingresos para el análisis de rentabilidad. Luego, se evaluó que tanto se podría reducir las emisiones de gases efecto invernadero con relación a una central convencional de Ciclo Rankine simple. Finalmente, se elaboró el análisis de los indicadores de rentabilidad, evaluando en primer lugar, la inversión que conlleva implementar una planta geotérmica para generar hidrógeno, el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), tiempo de recuperación de la inversión, considerando parámetros financieros como la inflación anual y la tasa de descuento para proyectos no financieros.

Para poder llevar a cabo el análisis termodinámico se emplearon las tablas termodinámicas correspondientes, de los autores Cengel & Boles (2014), las tablas de las propiedades de agua saturada y posteriormente se anexaron las fichas técnicas de los equipos seleccionados para la central geotérmica propuesta.

CAPÍTULO V : ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Resultados

5.1.1. Recopilar información respecto al hidrógeno y la energía geotérmica disponibles en el Perú

Energía Geotérmica

De acuerdo con el Informe realizado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA, por sus siglas en inglés) en el 2012, el Perú cuenta con un potencial geotérmico estimado en 2.86 GWe, confirmando que dicho valor es válido. En la Tabla 6 se puede apreciar el resumen del potencial geotérmico disponible en el Perú para producción de electricidad.

En la región geotérmica del Norte del Perú se tiene un potencial de 152 MWe para generación de energía eléctrica, en la región de Cajamarca – La Libertad se tiene una potencia geotérmica de 193 MWe para poder producir electricidad u otros usos, en la región geotérmica de Callejón de Huaylas se puede verificar un potencial geotérmico de 15.3 MWe en campos promisorios y 221 MWe en otros campos para generar energía eléctrica o emplearse para otras aplicaciones, la región de Churín tiene un potencial geotérmico de 125 MWe para aplicaciones específicas, la región Central posee un potencial geotérmico de 32 MWe, la región del Eje Volcánico Sur tiene un potencial para explotación de 897 MWe en campos promisorios y de 700 MWe en otros campos, y la región Cuzco – Puno se posee verificar un potencial geotérmico de 54.1 MWe en campos promisorios y de 470 MWe en otros campos. Resumiendo, en campos promisorios se tiene un potencial geotérmico de 966.4 MWe y en otros campos un potencial de 1894 MWe, sumando un total de 2860.4 MWe, que pueden ser explotados para generación de electricidad y otras aplicaciones, siendo un potencial realmente grande que puede ayudar en gran manera a lograrse la transición energética tan ansiada para el país.

Tabla 6

Campos geotérmicos disponibles en el Perú

Región geotérmica	N°	Región	Nombre del campo	Potencial geotérmico (MWe)	
				Campos promisorios	Otros campos
Norte del Perú	1	Tumbes	Tumbes		15
	2	Amazonas	El Almendral		10
	3	Amazonas	Corontochaca		7
	4	San Martín	San Mateo		14
	5	San Martín	Picurohuasi		58
	6	Loreto	Contamana		48
Cajamarca – La Libertad	7	Cajamarca	Quilcate		70
	8	Cajamarca	Cajamarca		29
	9	Cajamarca-La Libertad	Huaranchai		54
	10	La Libertad	Cachicadan		40
Callejón de Huaylas	11	Ancash-La Libertad	Tablachaca		29
	12	Ancash	Huancarhuas		89
	13	Ancash	Chancos	15.3	21
	14	Ancash	Olleros		29
	15	Huánuco-Ancash	Azulmina		53
Churín	16	Lima	Conoc		21
	17	Pasco	Huayllay		10
	18	Pasco	Tambochaca		24
	19	Lima	Oyon		45
	20	Lima	San José		25
Central	21	Junín	Yauli		7
	22	Huancavelica	Coris		10
	23	Huancavelica	Nonobamba		15
29Eje Volcánico Sur	24	Cusco-Apurímac	Cconoc		9
	25	Apurímac	Pincahuacho		25
	26	Apurímac	Antabamba		15
	27	Ayacucho	Puquio	34.3	10
	28	Ayacucho	Paila del diablo		54
	29	Ayacucho	Pararca		31
	30	Arequipa	Ocoruro		23
	31	Arequipa	Cotahuasi		65
	32	Arequipa	Orcopampa		29
	33	Arequipa	Cailloma	9.1	26
	34	Arequipa	Coropuna		15
	35	Arequipa	Chivay	162.9	136
	36	Arequipa	La Calera		9
	37	Arequipa	Yura		15
	38	Arequipa	Jesús		7
	39	Moquegua	Ubinas		24
	40	Moquegua	Ulucan	27.4	0
	41	Moquegua	Calacoa-Putina	108.2	45
	42	Moquegua	Collo/Titire	39.7	27
	43	Moquegua-Tacna	Crucero	79.4	3
	44	Tacna	Tutupaca	113.8	29
	45	Tacna	Calientes	100.0	0
	46	Tacna	Ancocollo	98.2	55
	47	Tacna	Borateras	40.0	31
	48	Tacna	Chungara-Kallapuma	84.0	17
Cuzco – Puno	49	Cusco	Machu-Picchu		49
	50	Cusco	Choquecancha		43
	51	Cusco	Pacchanta-Marcapata		40
	52	Cusco	La Raya		26
	53	Puno	Ollachea		45
	54	Puno	Pasanocollo		65
	55	Puno	Hatun Phutina		39
	56	Puno	Putina		53
	57	Puno	Chaqueylla		26
	58	Puno	Pinaya	36.8	27
	59	Moquegua	Jesús María	17.3	17
	60	Moquegua	Exchage		27
	61	Puno	Collpa Apacheta		13
Subtotal				966.4	1 894
Total				2 860	

Nota: Tomada de (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012).

En Arequipa se encuentra el campo geotérmico de Achumani, considerado el campo geotérmico con el mayor potencial para poder implementar una central geotérmica con un potencial superior al de la planta geotérmica Leyte ubicada en Filipinas que tiene una potencia instalada de 700 MW (Perú Energía, 2019).

Hidrógeno

El hidrógeno es prácticamente un recurso ilimitado, pero para producirlo de modo que no se genere contaminación ambiental es necesario emplear una fuente de energía renovable como, por ejemplo, la energía solar fotovoltaica, la energía eólica y geotérmica, para que sea una energía netamente limpia, es decir, hidrógeno verde.

Entre los principales principios físicos empleados para generar hidrógeno se tiene al reformado de gas metano, con una eficiencia de 70 a 85% para una producción a gran escala y una madurez comercial, con una potencia de generación de entre 150 a 300 MW para una vida útil de 30 años, y un costo de inversión de USD 400 a USD 600 por kW. Para una producción a pequeña escala, se tiene una eficiencia aproximadamente de 51%, pero con una madurez aún en etapa de demostración, una vida útil de 15 años, una inversión de USD 3000 a USD 5000 por kW y puede generarse entre 150 kW a 15 MW.

Empleando el principio físico de electrólisis, se puede emplear la tecnología para un proceso alcalino, donde se puede producir una potencia de hasta 150 MW, con una madurez comercial, costo de inversión de entre USD 850 a USD 1500 por kW, una eficiencia mínima de 65% y máxima de 82%, una vida útil de 60000 a 90000 horas.

Empleando pilas de combustible (PEM, membrana de intercambio de protones) se puede generar hasta 150 kW, si es una pila, y hasta 1 MW, empleando un sistema complejo, posee una madurez comercial en inicio, un costo de inversión de USD 1500 a USD 3800 por kW, puede llegar a tener una eficiencia mínima de 65% y máxima de 78%, una vida útil de 20000 a 60000 horas.

Finalmente, se tiene a la tecnología SOE (Electrolizador de óxido sólido), con un nivel de potencia aún en análisis, madurez en investigación, con una eficiencia aproximada de entre 85 y 90%, con una vida útil de aproximadamente 1000 horas.

Tabla 7

Tecnologías de Producción de hidrógeno y su rendimiento actual

Principio Físico	Tecnología	Potencia	Madurez	Costos de inversión (USD/kW)	Eficiencia (%)	Vida útil
Reformado de gas metano	Gran escala	150-300 MW	Comercial	400-600	70-85	30 años
	Pequeña escala	0,15-15 MW	Demostración	3.000-5.000	~51	15 años
Electrólisis	Alcalino	Hasta 150 MW	Comercial	850-1.500	65-82	Entre 60k y 90k horas
	PEM	Hasta 150 kW (pilas) Hasta 1 MW (sistemas)	Inicio Comercial	1.500-3.800	65-78	Entre 20k y 60k horas
	SOE	Nivel laboratorio	Investigación	-	85-90	~1.000 horas

Nota: Tomada de (Vásquez & Salinas, 2018).

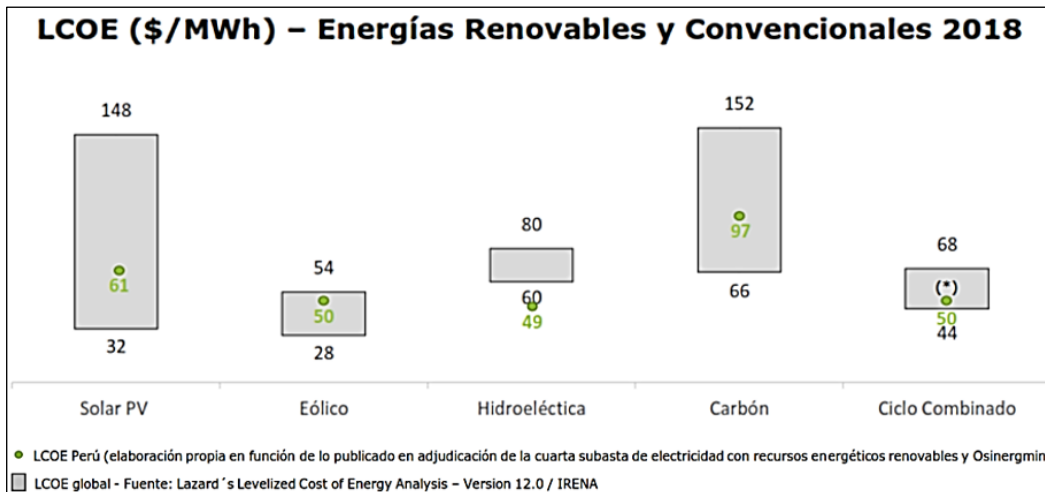
Costo nivelado de energía

El uso de fuentes energéticas renovables es realmente importante y poseen el potencial para satisfacer total y plenamente los requerimientos energéticos de todo el mundo y en simultáneo se obtiene una reducción significativa en las emisiones de gases efecto invernadero y mitigación del impacto ambiental o cambio climático (Deloitte, 2021).

De la Figura 16 se puede mencionar que el costo nivelado LCOE (\$/MWh) para el 2018 para la energía solar esta entre \$32 y \$148 por MWh, con un promedio de \$61 por MWh, para la energía eólica está entre \$28 y \$54 por MWh, con promedio de \$50 por MWh, para la energía hidráulica está entre \$60 y \$80 por MWh, con un promedio de \$49 por MWh, para el carbón está entre \$66 y \$152 por MWh, con un promedio de \$97 por MWh y para ciclo combinado está entre \$44 y \$68 por MWh, con un promedio de \$50 por MWh.

Figura 16

Costo nivelado LCOE (\$/MWh) para energías renovables y convencionales 2018

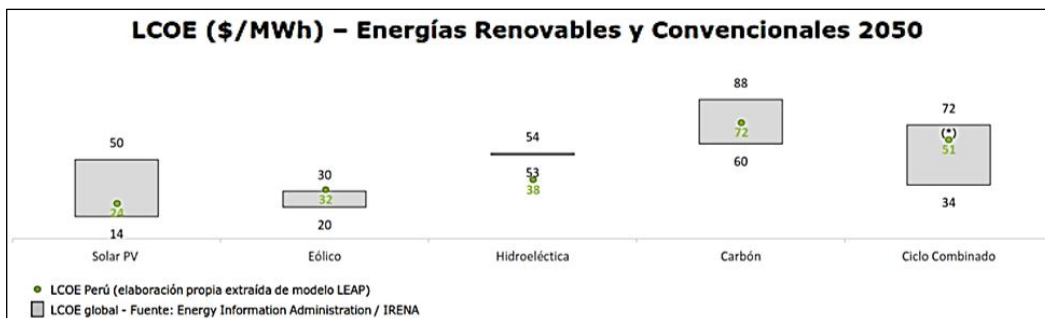


Nota: Tomada de (Deloitte, 2021).

En la Figura 17 se puede apreciar el costo nivelado LCOE (\$/MWh) para energías renovables y convencionales para el 2050. La energía Solar PV tiene un LCOE entre \$14 a \$50 por MWh, con un promedio de \$24 por MWh, la energía eólica se encuentra entre \$20 a \$30 por MWh, con un promedio de \$32 por MWh, la hidráulica tiene un LCOE entre \$53 y \$54 por MWh, con un promedio de \$38 por MWh, el carbón posee un LCOE entre \$60 y \$88 por MWh, con un promedio de \$72 por MWh, y para ciclo combinado se tiene un LCOE de entre \$34 y \$72 por MWh, con un promedio de \$51 por MWh.

Figura 17

Costo nivelado LCOE (\$/MWh) para energías renovables y convencionales 2050

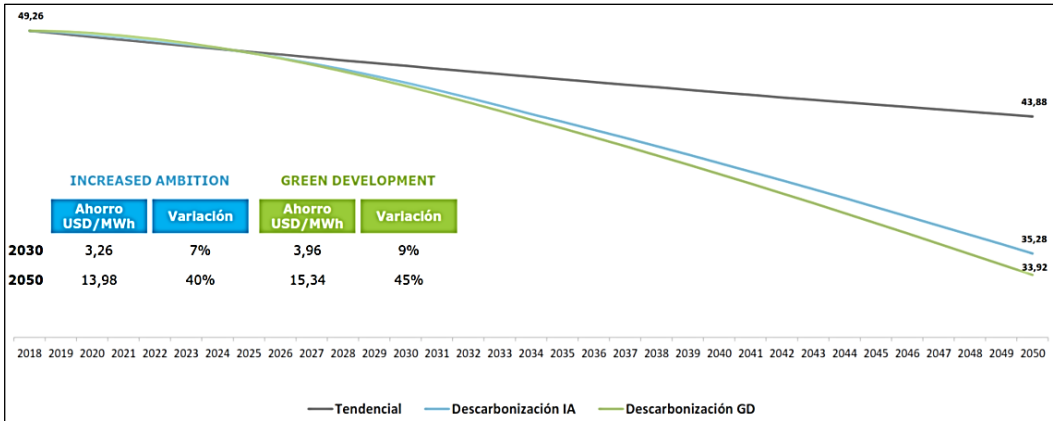


Nota: Tomada de (Deloitte, 2021).

En la Figura 18 se puede observar una gráfica evolutiva tendencial del costo nivelado LCOE (\$/MWh) desde el 2018 al 2050. Para mayor ambición (Increased Ambition), en el 2030 se puede obtener un ahorro de USD 3,26

por MWh, una variación de 7%, y para el 2050, un ahorro de 13,98 USD por MWh, es decir, una variación del 40%. Considerando desarrollo verde (Green Development), se puede obtener un ahorro de 3,96 USD por MWh para el 2030, con una variación de 9%, y para el 2050, un ahorro de USD 15,34 por MWh, es decir, una variación del 45% (Deloitte, 2021).

Figura 18
Gráfica evolutiva tendencial del costo nivelado LCOE (USD/MWh)



Nota: Tomada de (Deloitte, 2021).

Costo nivelado del hidrógeno

De acuerdo con un análisis realizado por H2 Perú (2021), se determinó que el costo nivelado de hidrógeno verde (LCOH) es de USD 2.6, USD 1.9 y USD 1.3 por kg para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente.

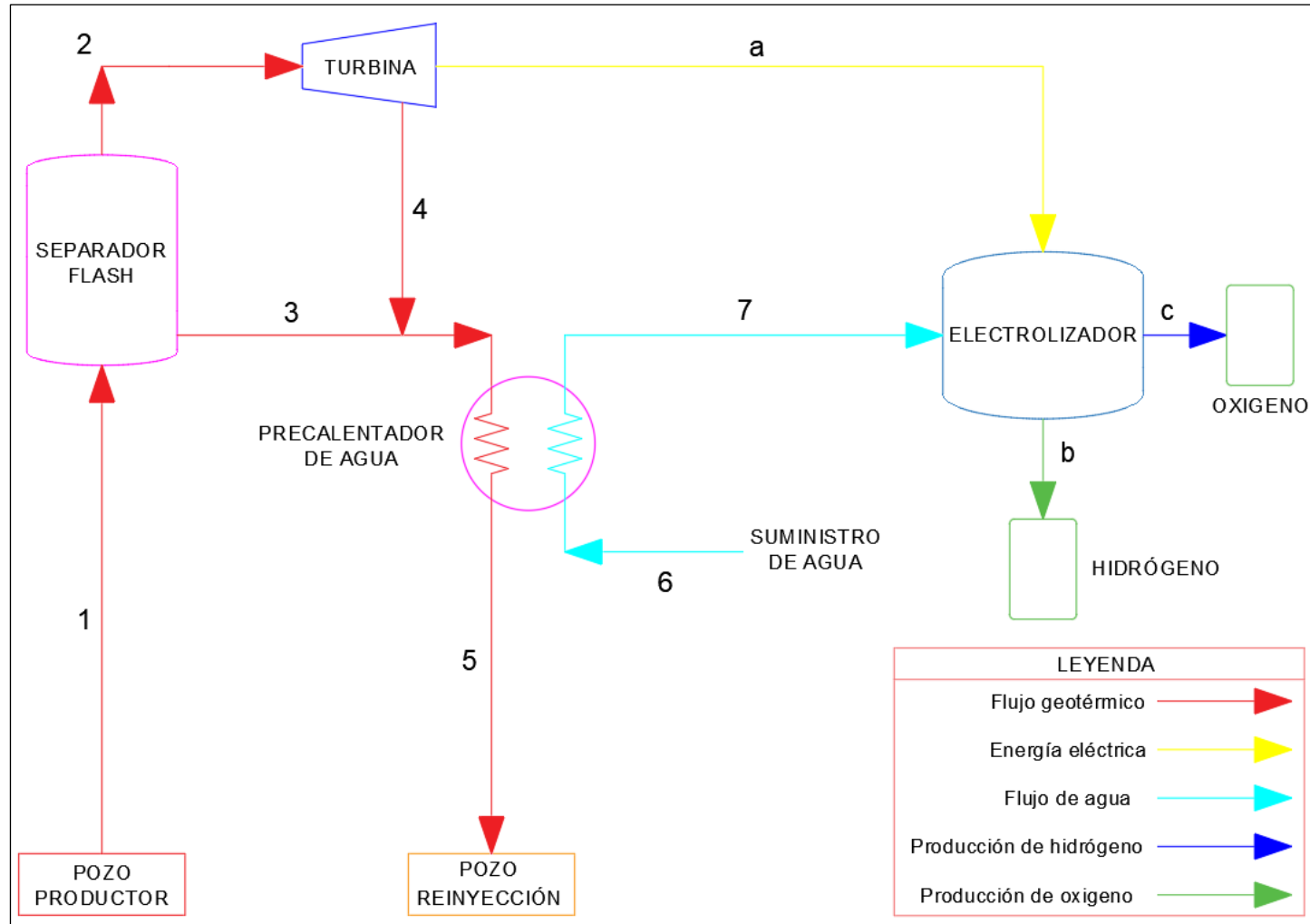
5.1.2. Analizar el potencial geotérmico para generar hidrógeno

La energía geotérmica tiene el potencial suficiente para generar grandes cantidades de hidrógeno, por lo que, se empleó un Ciclo Rankine para poder analizar la producción de electricidad para ser suministrado al Electrolizador, para luego, suministrar agua y separar las partículas de hidrógeno y oxígeno, pudiendo almacenarse por separado y ser vendido para las diferentes instituciones que lo requieran.

En la Figura 19 se puede observar el esquema de una planta geotérmica para generar hidrógeno y oxígeno, del cual se hizo su análisis posteriormente.

Figura 19

Esquema de una planta geotérmica para generar hidrógeno y oxígeno



Nota: Elaborado con AutoCAD 2022.

Para poder realizar el análisis del Ciclo Rankine, es necesario seleccionar un campo geotérmico con un potencial de aproximadamente 100 MW, pudiendo seleccionarse los que se ubican en la zona sur del Perú, donde el campo geotérmico de Calacoa-Putina, posee un potencial posible de desarrollo de 100 MWe (Ver Tabla 8).

Tabla 8

Campos geotérmicos y su potencial para desarrollo

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

Nota: Tomada de (Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2012).

Luego, se tiene las posibles temperaturas para los diferentes campos geotérmicos en el Anexo 1, además de sus diferentes características, donde el campo Calacoa-Putina se ha considerado una temperatura de 186 °C, en los manantiales calientes de NaKCa. Entonces, se tiene lo siguiente:

Estado 1: Empleando tablas de las propiedades termodinámicas para el agua del autor Cengel & Boles (2014), del Anexo 2 y del Anexo 3, se tiene lo siguiente:

$$T_1 = 186 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Empleando el Anexo 2, interpolando para determinar la presión de acuerdo a la temperatura de extracción del agua geotérmica del pozo de extracción.

Tabla 9*Cálculo de la presión para el pozo de extracción*

P (kPa)	T (°C)
1123.50	185
1149.84	186
1255.20	190

Nota: Elaboración propia.

Entonces, la presión es:

$$P_1 = 1149.84 \text{ kPa}$$

La bomba para el pozo de extracción tiene una presión de 1149.84 kPa.

Seguidamente, calculando los demás parámetros:

Tabla 10*Cálculo del volumen específico estado 1*

v (m³/kg)	T (°C)
0.001134	185
0.001135	186
0.001141	190

Nota: Elaboración propia.

$$v_1 = 0.001135 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Tabla 11*Cálculo de la entalpía de líquido saturado estado 1*

hf (kJ/kg)	T (°C)
785.19	185
789.64	186
807.43	190

Nota: Elaboración propia.

$$h_{f1} = 789.64 \text{ kJ/kg}$$

Tabla 12*Cálculo de la entalpía de vapor saturado estado 1*

hg (kJ/kg)	T (°C)
2781.40	185
2782.18	186
2785.30	190

Nota: Elaboración propia.

$$h_{g1} = 2782.18 \text{ kJ/kg}$$

Tabla 13*Cálculo de la entropía de líquido saturado estado 1*

sf (kJ/kg. K)	T (°C)
2.187500	185
2.197100	186
2.235500	190

Nota: Elaboración propia.

$$s_{f1} = 2.1971 \frac{kJ}{kg.K}$$

Tabla 14*Cálculo de la entropía de vapor saturado estado 1*

sg (kJ/kg. K)	T (°C)
6.5447	185
6.5369	186
6.5059	190

Nota: Elaboración propia.

$$s_{g1} = 6.5369 \frac{kJ}{kg.K}$$

La entalpía es de:

$$h_1 = 1650 \text{ kJ/kg}$$

La calidad de la mezcla bifásica es:

$$x_1 = \frac{h_1 - h_{f1}}{h_{g1} - h_{f1}} = \frac{1650 \frac{kJ}{kg} - 789.64 \frac{kJ}{kg}}{2782.18 \frac{kJ}{kg} - 789.64 \frac{kJ}{kg}} = 0.4318$$

Estado 2: Al usar el separador flash, se tiene vapor saturado, entonces se tuvo lo siguiente:

$$T_2 = 186 \text{ °C}$$

$$P_2 = 1149.84 \text{ kPa}$$

$$h_2 = h_{g1} = 2782.18 \text{ kJ/kg}$$

$$s_2 = s_{g1} = 6.5369 \frac{kJ}{kg.K}$$

Estado 3: En este estado se tiene liquido saturado, por lo que, sus parámetros son:

$$T_3 = 186 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_3 = 1149.84 \text{ kPa}$$

$$h_3 = h_{f1} = 789.64 \text{ kJ/kg}$$

Estado 4: Se tiene la salida de la turbina, considerando una eficiencia isoentrópica de 100%, se tuvo que:

$$s_4 = s_2 = 6.5369 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$P_4 = 100 \text{ kPa}$$

La calidad del fluido es:

$$s_{f4} = 1.3028 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$s_{g4} = 7.3589 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_{f4}}{s_{g4} - s_{f4}} = \frac{6.5369 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} - 1.3028 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}}{7.3589 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} - 1.3028 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}} = 0.8643$$

La entalpia es:

$$h_{f4} = 417.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{g4} = 2675 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = h_{f4} + x_4 (h_{g4} - h_{f4}) = 417.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.8643 (2675 - 417.51) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = 2368.66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Estado 5: Se tiene una válvula de estrangulamiento, que reduce la presión a 100 kPa, pero mantiene constante la entalpia, entonces se tiene que:

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

$$h_5 = h_3 = 789.64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Luego, el trabajo de la turbina es:

$$w_{turbina} = h_2 - h_4 = 2782.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2368.66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 413.52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

El trabajo de la bomba es:

$$w_{bomba} = v_1 (P_2 - P_1) = 0.001135 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (1149.84 - 100) \text{ kPa} \times \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}$$

$$w_{bomba} = 1.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

El trabajo neto del Ciclo Rankine es:

$$w_{neto} = w_{turbina} - w_{bomba} = 413.52 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 412.33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

El flujo másico teórico de la turbina considerando la potencia nominal de 100 MW, fue de:

$$W_{turbina} = 100 \text{ MW}$$

$$\dot{m} = \frac{W_{turbina}}{w_{neto}} = \frac{100 \times 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{412.33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 242.52 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Ahora, para que el Ciclo Rankine se pueda analizar de una manera más real, se consideraron las eficiencias isoentrópicas de la bomba y la turbina, teniendo lo siguiente:

$$\eta_{bomba} = 0.80$$

$$\eta_{turbina} = 0.85$$

Estado 1r: Para la bomba, se tiene que:

$$w_{bomba \text{ real}} = \frac{w_{bomba}}{\eta_{bomba}} = \frac{1.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0.80} = 1.4875 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Estado 4r: Para la salida de la turbina, se tuvo:

$$h_{4r} = h_2 - \eta_{turbina} \times w_{turbina} = 2782.18 \frac{kJ}{kg} - 0.85 \left(412.33 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$h_{4r} = 2431.70 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{turbina\ real} = \eta_{turbina} \times w_{turbina} = 0.85 \left(412.33 \frac{kJ}{kg} \right) = 350.48 \frac{kJ}{kg}$$

El trabajo neto real del Ciclo Rankine fue:

$$w_{neto\ real} = w_{turbina\ real} - w_{bomba\ real} = 350.48 \frac{kJ}{kg} - 1.4875 \frac{kJ}{kg}$$

$$w_{neto\ real} = 348.9925 \frac{kJ}{kg}$$

El flujo másico real del Ciclo Rankine es:

$$\dot{m}_{real} = \frac{W_{turbina}}{w_{neto\ real}} = \frac{100 \times 10^3 \frac{kJ}{s}}{348.9925 \frac{kJ}{kg}} = 286.54 \frac{kg}{s}$$

Entonces, para poder generar 100 MW de potencia nominal efectiva, se debe generar 286.54 kg/s.

El flujo de masa del fluido geotérmico es:

$$\dot{m}_{fluido\ geot\acute{e}rmico} = \frac{\dot{m}_{real}}{0.4318} = \frac{286.54 \frac{kg}{s}}{0.4318} = 663.59 \frac{kg}{s}$$

Generación de hidrógeno

De acuerdo con investigaciones, por cada kg de H_2 , se consumen 49 kWh de electricidad, entonces se tuvo que:

$$\dot{m}_{hidr\acute{o}geno} = \frac{100 \times 10^3\ kW \times 8592 \frac{h}{a\tilde{n}o}}{\frac{49\ kWh}{1\ kg\ H_2}} = 17\ 534\ 693.88 \frac{kg\ H_2}{a\tilde{n}o}$$

$$\dot{m}_{hidr\acute{o}geno} = 17\ 534\ 693.88 \frac{kg\ H_2}{a\tilde{n}o} \times \frac{1\ a\tilde{n}o}{8592\ h} = 2040.82 \frac{kg\ H_2}{h}$$

El oxígeno se puede determinar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{oxígeno} = 2040.82 \frac{kg H_2}{h} \times \frac{0.032 kg O_2}{0.004 kg H_2} = 16\,326.56 \frac{kg O_2}{h}$$

$$\dot{m}_{oxígeno} = 16\,326.56 \frac{kg O_2}{h} \times \frac{8592 h}{1 año} = 140\,277\,803.5 \frac{kg O_2}{año}$$

Selección de equipos

Para poder realizar una evaluación sobre la rentabilidad de una central geotérmica para generar hidrógeno, es necesario conocer los equipos que conforman a dicha central con el fin de poder determinar la inversión para su implementación. Entonces se procedió de la siguiente manera:

Turbina de vapor

Dicho equipo debe poseer la capacidad de producir una potencia de 100 MW, por tanto, se ha seleccionado una turbina WEG CT/CTE Condensación – Extracción de 100 MW, sus propiedades técnicas pueden verse en el Anexo 5.

Bomba de extracción

La bomba utilizada debe contar con la potencia adecuada para garantizar la extracción eficiente del fluido geotérmico desde los pozos de producción, y dicha potencia debe ser:

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_{fluido\ geotérmico} \times w_{bomba\ real}$$

$$\dot{W}_{bomba} = 663.59 \frac{kg}{s} \times 1.4875 \frac{kJ}{kg} = 987.09 kW$$

$$\dot{W}_{bomba} = 987.09 kW \times \frac{1 hp}{0.746 kW} = 1323.18 hp$$

La bomba debe tener una potencia de 987.09 kW o equivalente a 1323.18 hp, con un caudal de trabajo de 2725 m³/h. La bomba seleccionada es la Goulds Pumps 3409 de capacidad media, en el Anexo 6 se adjuntó sus datos técnicos.

Intercambiador de calor

El intercambiador de calor requerido debe tener una capacidad de operación de 2725 m³/h. Con base en el análisis realizado, se seleccionó el

modelo Alfa Laval CP120 como el equipo más adecuado. La ficha técnica correspondiente puede consultarse en el Anexo 7.

Electrolizador

Este dispositivo debe poseer la capacidad de producir una potencia de 100 MW, por ende, se seleccionó un electrolizador TCI Gecomp de 100 MW, sus datos técnicos se pueden consultar en el Anexo 8.

5.1.3. Determinar el impacto ambiental de emplear hidrógeno y energía geotérmica para la transición energética en el Perú

En la investigación realizada por Basosi et al. (2020), obtuvieron que el puntaje para la energía geotérmica fue de 0.0177 kg CO_2 por kWh, entonces, el índice de impacto ambiental de generar hidrógeno empleando energía geotérmica es de:

$$E_{geotérmica} = 100 \times 10^3 \text{ kW} \times 8760 \text{ h} = 876 \times 10^6 \text{ kWh}$$

Luego;

$$C_{geotérmica} = 0.0177 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}} \times 876 \times 10^6 \text{ kWh}$$

$$C_{geotérmica} = 15.5052 \times 10^6 \text{ kg } CO_2$$

$$C_{geotérmica} = 15.5052 \times 10^3 \text{ t } CO_2$$

Al establecer una comparación con una central de Ciclo Rankine convencional, la cual presenta una emisión promedio de 0.250 kg CO_2 /kWh (GenCat, 2022), se obtuvieron los resultados siguientes:

$$C_{central \text{ térmica}} = 0.250 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}} \times 876 \times 10^6 \text{ kWh}$$

$$C_{central \text{ térmica}} = 219 \times 10^6 \text{ kg } CO_2$$

$$C_{central \text{ térmica}} = 219 \times 10^3 \text{ t } CO_2$$

Donde la reducción de emisiones de dióxido de carbono fue de:

$$R_{CO_2} = C_{central \text{ térmica}} - C_{geotérmica}$$

$$R_{CO_2} = 219 \times 10^3 \text{ t } CO_2 - 15.5052 \times 10^3 \text{ t } CO_2$$

$$R_{CO_2} = 203.4948 \times 10^3 \text{ t } CO_2$$

En porcentaje:

$$R_{CO_2} (\%) = \frac{203.4948 \times 10^3 \text{ t } CO_2}{219 \times 10^3 \text{ t } CO_2} \times 100\%$$

$$R_{CO_2} (\%) = 92.92\%$$

Obteniendo una reducción de 203.4948 mil toneladas de dióxido de carbono, es decir, del 92.92% con respecto a la central térmica convencional de Ciclo Rankine. Demostrando que emplear energía geotérmica ayuda a mitigar el impacto ambiental, con un porcentaje de reducción bastante considerable.

5.1.4. Evaluar los parámetros financieros para determinar la rentabilidad de emplear energía geotérmica para generar hidrógeno

La inversión que conlleva la implementación de la central geotérmica de 100 MW para generar hidrógeno se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15

Inversión para central geotérmica para producción de hidrógeno

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Turbina de vapor de 100 MW	1 und	S/. 200 000 000.00	S/. 200 000 000.00
Bomba para pozo de 1 MW	4 und	S/. 6 000 000.00	S/. 24 000 000.00
Intercambiador de calor	1 und	S/. 12 000 000.00	S/. 12 000 000.00
Electrolizador de 100 MW	1 und	S/. 300 000 000.00	S/. 300 000 000.00
Tanque para almacenar hidrógeno	1 und	S/. 7 000 000.00	S/. 7 000 000.00
Tanque para almacenar oxígeno	1 und	S/. 7 000 000.00	S/. 7 000 000.00
Tanque separador flash	1 und	S/. 20 000 000.00	S/. 20 000 000.00
Válvula de estrangulamiento	1 und	S/. 2 000 000.00	S/. 2 000 000.00
Accesorios red de tuberías	1 glb	S/. 5 000 000.00	S/. 5 000 000.00
Red de tuberías	1 glb	S/. 80 000 000.00	S/. 80 000 000.00
Infraestructura	1 glb	S/. 20 000 000.00	S/. 20 000 000.00
Accesorios para equipamiento	1 glb	S/. 15 000 000.00	S/. 15 000 000.00
Total (sin IGV)			S/. 692 000 000.00
IGV (18%)			S/. 124 560 000.00
Total (con IGV)			S/. 816 560 000.00
Imprevistos (10%)			S/. 81 656 000.00
Inversión total de la central			S/. 898 216 000.00

Nota: Elaboración propia.

El costo de inversión para implementar la central mencionada asciende a la suma de S/. 898 216 000.00, incluyendo el equipamiento, infraestructura y accesorios necesarios.

Selección de vida útil de la central geotérmica

De acuerdo con la Tabla 16, el tiempo u horizonte para evaluar el proyecto es de 20 años, considerado futuro medio, ya que la vida útil de una central térmica o geotérmica es de más de 20 años, porque sus equipos más importantes cuentan con estas características, también se debe definir de acuerdo a la Ley de Concesiones Eléctricas del Perú, cuyo artículo 21 establece que el tiempo de la concesión eléctrica es ilimitado, por lo tanto la vida del proyecto es de 20 años.

Tabla 16

Horizontes de evaluación para proyectos de inversión

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

Nota: Tomada de (Castillo & Zhangallimbay, 2021).

Ahorro por concepto de energía

Para calcular el ahorro energético, es necesario considerar el costo de la energía eléctrica en la ubicación específica de la central geotérmica. En este caso, se toma como referencia la subestación Moquegua, que opera durante 358 días al año, destinando 7 días a labores de mantenimiento. La planta geotérmica cuenta con una capacidad instalada de 100 MW y opera con un factor de planta de 0.9. Considerando un régimen operativo de 19 horas diarias en horario fuera de punta y 5 horas en horario punta, se obtiene una producción anual de 612 180 000 kWh en horas fuera de punta y 161 100 000 kWh en horas punta. Los costos de energía aplicables son S/.0.2476 por kWh en horas fuera de punta, S/.0.3017 por kWh en horas punta, y un cargo de S/.29.73 por kW-mes. Esta información se resume en la Tabla 17:

Tabla 17*Ahorro monetario obtenido debido a generación de potencia y energía*

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total (S/.)
Energía en HP	161 100 000 kWh	S/. 0.3017 / kWh	S/. 48 603 870.00
Energía en HFP	612 180 000 kWh	S/. 0.2476 / kWh	S/. 151 575 768.00
Potencia anual	1 080 000 kW	S/. 29.73 / kW-mes	S/. 32 108 400.00
Total			S/. 232 288 038.00

Nota: Elaboración propia.

Entonces, se tiene un ahorro por concepto de energía generada y potencia al año de S/. 232 288 038.00, tanto para horas punta y fuera de punta.

Venta de hidrógeno generado

Se generan 17534693.88 kg, donde su costo nivelado es de S/.8.11 por cada kg (hasta 2040) y de S/.5.93 por cada kg (2041 a 2050). Empleando dicha información se obtuvo la Tabla 18:

Tabla 18*Ingresos obtenidos por las ventas de hidrógeno (2024-2043)*

Año	Precio (S/. / kg)	Producción (kg)	Costo total (S/.)
2024	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2025	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2026	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2027	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2028	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2029	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2030	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2031	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2032	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2033	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2034	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2035	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2036	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2037	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2038	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2039	S/. 8.11	17 534 693.88	S/. 142,241,436.75
2040	S/. 5.93	17 534 693.88	S/. 103,945,665.32
2041	S/. 5.93	17 534 693.88	S/. 103,945,665.32
2042	S/. 5.93	17 534 693.88	S/. 103,945,665.32
2043	S/. 5.93	17 534 693.88	S/. 103,945,665.32

Nota: Elaboración propia.

Venta de oxígeno generado

Se generan 140277803.50 kg al año, el cual tiene un precio de venta de S/.2.00 por cada kg, y con dicha información se obtuvo la Tabla 19:

Tabla 19

Ingresos obtenidos por las ventas de oxígeno (2024-2043)

Año	Producción (kg)	Precio (S/. / kg)	Costo total (S/.)
2024	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2025	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2026	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2027	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2028	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2029	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2030	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2031	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2032	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2033	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2034	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2035	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2036	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2037	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2038	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2039	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2040	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2041	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2042	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00
2043	140 277 803.50	S/. 2.00	S/. 280 555 607.00

Nota: Elaboración propia.

Consideraciones al realizar el análisis rentable

Para el desarrollo del análisis de rentabilidad, se tomaron en cuenta los datos presentados en la Tabla 20:

Tabla 20

Expectativa de inflación (2022-2023)

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

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

Nota: Tomada de (BCRP, 2022).

En el presente estudio se ha considerado una tasa de inflación del 4% aplicable a las sociedades no financieras, la cual se asume constante a partir del año 2024 en adelante.

Análisis de rentabilidad

Una vez estimados todos los ingresos y egresos asociados a la operación de la central geotérmica destinada a la producción de hidrógeno, se procedió a la elaboración de la Tabla 21, la cual detalla el horizonte temporal del análisis, comprendido entre los años 2024 y 2043. En este análisis se consideró una inversión inicial de S/.898216000.00, así como un costo de operación y mantenimiento (O&M) equivalente al 20 % de dicha inversión, el cual incluye gastos por remuneraciones, seguros, indemnizaciones, operación, mantenimiento, entre otros. Además, se contempló un costo de permisos de S/. 1000000.00. En cuanto a los ingresos, se consideró un ahorro anual en consumo energético equivalente a S/.232288038.00, ingresos por la venta de hidrógeno de S/.142241436.75 anuales entre los años 2024 y 2039, y de S/.103945665.32 para el periodo comprendido entre 2040 y 2043. Asimismo, se incluyeron ingresos anuales por la venta de oxígeno, estimados en S/.280555607.00.

Tabla 21

Análisis de indicadores de rentabilidad, considerando una inflación anual del 4% y una tasa de interés de 9% anual

Ítem	Año	Inversión	O&M	Permisos	Ahorro de energía	Venta de hidrógeno	Venta de oxígeno	Ingreso Bruto	Impuesto a la Renta	Ingreso Neto	Ingreso Neto Actualizado
0	2023	-S/. 898,216,000.00								-S/. 898,216,000.00	-S/. 898,216,000.00
1	2024		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 319,335,881.95	S/. 285,121,323.17
2	2025		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 307,053,732.64	S/. 244,781,355.74
3	2026		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 295,243,973.70	S/. 210,148,828.76
4	2027		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 283,888,436.25	S/. 180,416,233.48
5	2028		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 272,969,650.24	S/. 154,890,310.34
6	2029		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 262,470,817.54	S/. 132,975,884.56
7	2030		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 252,375,786.09	S/. 114,161,988.81
8	2031		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 242,669,025.09	S/. 98,009,949.18
9	2032		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 233,335,601.05	S/. 84,143,156.92
10	2033		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 224,361,154.85	S/. 72,238,287.19
11	2034		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 215,731,879.67	S/. 62,017,760.30
12	2035		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 207,434,499.68	S/. 53,243,269.49
13	2036		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 199,456,249.69	S/. 45,710,224.49
14	2037		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 191,784,855.47	S/. 39,242,981.19
15	2038		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 184,408,514.88	S/. 33,690,746.21
16	2039		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 142,241,436.75	S/. 280,555,607.00	S/. 474,441,881.75	S/. 142,332,564.53	S/. 177,315,879.69	S/. 28,924,060.97
17	2040		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 103,945,665.32	S/. 280,555,607.00	S/. 436,146,110.32	S/. 130,843,833.10	S/. 156,734,021.02	S/. 22,827,423.19
18	2041		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 103,945,665.32	S/. 280,555,607.00	S/. 436,146,110.32	S/. 130,843,833.10	S/. 150,705,789.45	S/. 19,597,719.09
19	2042		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 103,945,665.32	S/. 280,555,607.00	S/. 436,146,110.32	S/. 130,843,833.10	S/. 144,909,412.93	S/. 16,824,964.88
20	2043		S/. 179,643,200.00	S/. 1,000,000.00	S/. 232,288,038.00	S/. 103,945,665.32	S/. 280,555,607.00	S/. 436,146,110.32	S/. 130,843,833.10	S/. 139,335,973.97	S/. 14,444,509.68

Nota: Elaboración propia.

Tabla 22

Indicadores para análisis de rentabilidad

Ingreso total neto	S/. 1,913,410,977.65
VAN	S/. 1,015,194,977,65
Inflación anual	4%
Tasa de interés anual	12%
Vida útil del proyecto	20 años

Nota: Elaboración propia.

Posteriormente al análisis de rentabilidad presentado en la Tabla 21, se procedió al cálculo de los principales indicadores financieros: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión inicial. Para dicho análisis, se consideró una tasa de inflación anual del 4 % y una tasa de interés del 12 %, conforme a lo establecido en la Ley de Concesiones Eléctricas. Los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 23.

Tabla 23

Indicadores de rentabilidad

Indicadores para análisis de rentabilidad	
Inversión	- S/. 898 216 000.00
Ingreso total neto actualizado	S/. 1 913 410 977.65
VAN	S/. 1 015 194 977.65
TIR	31.63%
Tasa de descuento	12%
Inflación	4%
t_r (años)	3.88

Nota: Elaboración propia.

Del análisis se puede decir que el ingreso total neto actualizado luego del análisis de rentabilidad fue de S/. 1 913 410 977.65, con un Valor Actual Neto de S/. 1 015 194 977.65, una Tasa Interna de Retorno de 31.63% y un tiempo de retorno de la inversión inicial de 3.88 años.

5.2. Discusión de resultados

De los resultados, se logró concluir que el emplear energía geotérmica para la producción en masa de hidrógeno es realmente atractivo, ya que la inversión se logra recuperar en alrededor de 3.88 años. En concordancia con Kuchen & Kozak (2020), quienes indican que se debe llegar a lograr la transición energética en un futuro, por lo que, es necesario buscar formas de generar energía eléctrica con fuentes energéticas renovables que no emitan gases contaminantes, aunque el hidrógeno en sí, es un vector energético, ya que no se encuentra en la naturaleza por sí solo, sino que debe emplearse un proceso previo para poder producirlo.

Según Gielen et al. (2019), el análisis revela que tanto la eficiencia energética como el desarrollo de tecnologías basadas en energías renovables constituyen pilares fundamentales en el proceso de transición energética, siendo igualmente relevantes las sinergias entre ambas. Esta transformación está respaldada por condiciones económicas favorables, disponibilidad generalizada de recursos, tecnologías con alta capacidad de escalabilidad y beneficios socioeconómicos significativos. De acuerdo con el estudio, las energías renovables tienen el potencial de cubrir hasta dos tercios de la demanda energética global y de contribuir de manera decisiva a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero requerida para mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2°C hacia el año 2050. En concordancia con dichos autores, se logró demostrar que el uso de la energía geotérmica para generar hidrógeno ayuda realmente a lograr la tan deseada transición energética, ya que se puede producir grandes cantidades de hidrógeno que posteriormente puede ser empleado por autos eléctricos que empleen pilas de combustible de hidrógeno, para centrales de hidrógeno, es decir, que las turbinas usen hidrógeno como combustible, y de esa manera reducir considerablemente las emisiones de gases contaminantes.

Zanabria Sequeiros (2019) concluyó que es importante la transición energética empleando energías renovables, que poseen un potencial significativo para reducir la contaminación, donde mencionan que Arabia Saudita ya tiene un 10% de su matriz energética, esto es, emplean fuentes

renovables de energía para generar la electricidad que necesitan. Adicionalmente, la Unión Europea, busca para el 2030 tener al menos el 30% de su producción de energía eléctrica mediante el uso de recursos energéticos renovables (RER). En Latinoamérica, Chile, Ecuador, Colombia y Argentina, con el 20%. Y es importante, que el Perú también tome cartas en el asunto y logre la transición energética, donde la presente investigación demostró que es rentable y atractivo usar la energía geotérmica para generar hidrógeno, aunque es solo un tipo de energía renovable, pudiendo hacerse un análisis para las demás fuentes energéticas renovables y plantear alternativas para lograr en el futuro un plan para la transición energética del país.

Gamio Aita (2018) menciona sobre la transición energética, que el país tiene el deber y compromiso de buscar la reducción de las emisiones de contaminantes perjudiciales para el medio ambiente, el cual se concepciona en el Tratado de París de 2015. Es por eso, que se debe buscar la aceleración de forma gradual en la matriz energética, buscando la eficiencia de emplear energías limpias y logrando un crecimiento descentralizado sostenible. En consideración con lo expuesto por dicho autor, la presente investigación sirve para demostrar la importancia de usar la energía geotérmica que es una fuente de energía renovable para producir hidrógeno, el cual puede ser vendido y usado por diferentes vehículos para reducir las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente y poder lograr la transición energética, buscando políticas que permitan y ayuden en el futuro para tal fin.

CAPÍTULO VI : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El potencial de la energía geotérmica disponible en el país es de 2.86 GWe, donde la mayor parte se concentra en la zona sur, la región del eje volcánico sur posee un potencial de 897 MWe. Con un costo nivelado de S/. 195 por MWh generado. El hidrógeno verde es el que se obtiene de emplear fuentes renovables de energía, donde su costo nivelado (LCOH) es de S/. 10.14, S/. 7.41 y S/. 5.07 por kg para el 2030, 2040 y 2050, respectivamente.
- Del análisis termodinámico realizado al Ciclo Rankine para la central geotérmica propuesta de 100 MW en el campo geotérmico de Calacoa-Putina, se obtuvo un flujo másico de vapor geotérmico de 286.54 kg/s para generar la potencia requerida, con una producción del pozo geotérmico de 663.59 kg/s, considerando 4 pozos geotérmicos de 165.8975 kg/s, logrando producir 2040.82 kg de hidrógeno por hora y 16 326.56 kg de oxígeno por hora.
- Del análisis de la central geotérmica de 100 MW, se demostró que se puede reducir en un 92.92% las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente, es decir, 203 494.8 toneladas de dióxido de carbono anualmente, una reducción significativa, demostrando que es importante el uso de la energía geotérmica para lograr la transición energética al generar hidrógeno verde.
- A partir de la evaluación de los parámetros financieros, se determinó que el ingreso total neto actualizado, tras el análisis de rentabilidad, asciende a S/.1913410977.65, presentando un Valor Actual Neto (VAN) de S/.1015194977.65, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 31.63 % y un periodo de recuperación de la inversión de 3.88 años, por tanto, dichos resultados evidencian que el uso de energía geotérmica para la producción de hidrógeno verde es económicamente viable y representa una alternativa rentable y atractiva.

6.2. Recomendaciones

- Existen varios tipos de fuentes energéticas renovables, pudiendo realizarse un análisis de cada una y así determinar su potencial para generar hidrógeno verde y así ayudar a la transición energética.
- De acuerdo a la fuente energética renovable, se debe realizar un análisis adecuado empleando la metodología desarrollada por distintos autores y guiarse de ella para poder satisfacer de forma segura los requerimientos de satisfacer la necesidad de lograr la transición energética.
- Evaluar el índice de contaminación o el porcentaje de reducción de las emisiones de gases contaminantes, con el propósito de demostrar si satisfacen la necesidad de llegar a la transición energética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Área Metropolitana Valle de Aburrá. (2023). *Energías Renovables*. Retrieved 15 de febrero de 2021, from Energías Renovables: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx>

Asociación Española del Hidrógeno. (2018). *Obtención y aplicaciones del hidrógeno*. Asociación Española del Hidrógeno.

Banco Mundial. (1 de diciembre de 2017). *Energía geotérmica*. <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/geothermal#:~:text=El%20potencial%20de%20generaci%C3%B3n%20de,que%20genera%20sol%2013%20GW>.

Basosi, R., Bonciani, R., Frosali, D., Manfrida, G., Parisi, M. L., & Sansone, F. (2020). Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems. *Sustainability*, 12(7), 1-29. <https://doi.org/10.3390/su12072786>

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

Blanco Wells, G. (2019). La vida social de la energía: apuntes para el estudio territorializado de las transiciones energéticas. *Sociologías*, 21(51), 160-185. <https://doi.org/10.1590/15174522-0215106>

Bona, P., & Coviello, M. F. (2016). *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur*. Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL).

Cardemil Iglesias, J. M. (2006). *Modelación de flujo bifásico en un pozo geotérmico*. Santiago de Chile: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO.

- Castillo, J. G., & Zhangallimbay, D. (2021). La tasa social de descuento en la evaluación de proyectos de inversión: Una aplicación para el Ecuador. *Revista de la CEPAL*, 134, 77-98.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Termodinámica*. Mc Graw Hill Educación.
- Çetiner, Z. S., Ertekin, C., & Gültay, B. (2016). Initial Assessment of Public Perception and Acceptance of Geothermal Energy Applications in Çanakkale. *Energy Procedia*, 1(97), 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.052>
- Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 13(25), 107-125. <https://doi.org/10.15446/cp.v12n25.70257>
- Deloitte. (2021). *Hoja de Ruta de Transición Energética hacia un Perú sin emisiones 2030 - 2050*. Deloitte.
- Díaz Huaina, G. N., & Guadalupe Gómez, E. (2021). Volcanic calderas and its relation to geothermal resources in southern Peru. *Revistas Investigación*, 24(47), 57-62. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20645>
- Dicks, A. L., & Rand, D. A. (2018). *Fuel Cell Systems Explained (Third Edit)*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118706992>
- Fernández Tuñón, D. (2022). *El hidrógeno como combustible del futuro*. Repositorio de la Universidad Pontificia.
- Gámez Franco, D. (2010). *El Hidrógeno y sus Aplicaciones Energéticas*. Instituto INS La Ferrería (Montcada I Reixac).
- GenCat. (25 de abril de 2022). *Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico*. https://canviclimatic.gencat.cat/es/actual/factors_demissio_associats_a_lenergia/
- Geotermia Online. (22 de abril de 2015). *La geotermia genera tanta electricidad como 13 centrales nucleares*. <https://geotermiaonline.com/4908/la-geotermia-genera-tanta-electricidad-como-13-centrales-nucleares/>
- H2 Perú. (2021). *Potencial del Hidrógeno Verde en el Perú*. Asociación Peruana de Hidrógeno - ENGIE Impact.

- IRENA. (2019). *A New World The Geopolitics of the Energy Transformation*. Global Commission on the Geopolitics of Energy Transformation.
- IRENA. (2019). *Renewable power generation costs in 2018*. International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. International Renewable Energy Agency.
- Jorquera, C. (28 de enero de 2020). *Piensa en Geotermia*. Los 10 principales países geotérmicos a Diciembre de 2019: según la capacidad de generación instalada (MWe): <https://www.piensageotermia.com/los-10-principales-paises-geotermicos-a-diciembre-de-2019-segun-la-capacidad-de-generacion-instalada-mwe/>
- Kępińska, B., & Kasztelewicz, A. (2015). Public Perception of Geothermal Energy in Selected European Countries. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, 1(1), 1-12.
- Meier, P. M., Alcolea Rodríguez, A., & Bethmann, F. (2015). Lessons Learned from Basel: New EGS Projects in Switzerland Using Multistage Stimulation and a Probabilistic Traffic Light System for the Reduction of Seismic Risk. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, 1-8.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2010). *Manual de Geotermia*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guiler, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). *Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada*. Fundación Naturgy.
- Nabalía. (9 de marzo de 2021). *Hidrógeno como fuente de energía: ventajas y desventajas*. Retrieved 28 de diciembre de 2022, from <https://nabalíaenergia.com/blog/hidrogeno-como-fuente-de-energia/>
- Perú Energía. (2019). *El mayor proyecto geotérmico en el mundo lo tiene Arequipa, pero con un futuro incierto*. <https://peruenergia.com.pe/el-mayor-proyecto-geotermico-en-el-mundo-lo-tiene-arequipa-pero-con-un-futuro-incierto/>

- Recalde, M., Zabaloy, F., & Guzowski, C. (2018). El Rol de la Eficiencia Energética en el Sector Residencial para la Transición Energética en la Región Latinoamericana*. *Trayectorias*, 20(47), 77-102.
- Sanchez Guzmán, J., Sanz López, L., & Ocaña Robles, L. (2011). *Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE).
- Siber Ventilación. (2016). *Energía geotérmica: ventajas y desventajas de su utilización*. Retrieved 28 de diciembre de 2022, from <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/energia-geotermica-ventajas-y-desventajas-de-su-utilizacion/>
- Suárez Alcántara, K. (2019). Un poco de todo sobre el HIDRÓGENO. *Ciencia*, 70(1), 72-80.
- TERMAS GEOMETRICAS. (2022). *De donde surge la energía geotérmica?* Retrieved 15 de febrero de 2021, from <https://www.termasgeometricas.cl/2019/11/08/de-donde-surge-la-energia-geotermica/>
- Vásquez, R., & Salinas, F. (2018). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile*. Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear.
- Westreicher, G. (2022). *Energía Geotérmica*. Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/energia-geotermica.html#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica%20es%20aquella,conforme%20mayor%20sea%20la%20profundidad.>
- World Energy Trade. (13 de agosto de 2021). *La energía nuclear es la fuente más confiable y con un enorme potencial de desarrollo*. <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/general/la-energia-nuclear-es-la-fuente-mas-confiable-y-con-un-enorme-potencial-de-desarrollo>
- Younas, U., Khan Khan, B., Ali, S., & Mehmood, C. A. (2016). Pakistan geothermal renewable energy potential for electric power generation: A survey.

Renewable and Sustainable Energy Reviews(63), 398-413.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.038>

ANEXOS

Anexo 1 – Clasificación de los campos geotérmicos en el Perú y sus características

					Manantiales Calientes				Potencial (MWe)			No. De sector	Posible Capacidad a Desarrollar (MWe)	Red Connection			
Región Geotérmica	No.	Región	Nombre del Campo	Elevación (m a.s.l.)	Manantiales calientes	T NaKCa-max (°C)	T K/Mg-max (°C)	Cl max (ppm)	Campos Promisorios*	Otros Campos	Total			Posible Subestación	Distancia (km)		Área Protegida
(Perú Norte)	1	Tumbes	Tumbes	64	48	72	117	8,400			15	2		Tumbes S/S	11		
	2	Amazonas	El Almendral	449	45	72	107	565			10	2		Nueva Jaén S/S	33		
	3	Amazonas	Corontochaca	1583	28	39	56	183,000			7	5		Caclic S/S (2015)	36		
	4	San Martín	San Mateo	1048	41	87	44	2,450			14	3		Moyobamba Nueva S/S (2015)	36		
	5	San Martín	Picurohuasi	238	63	176	125	396,000			58	6		Tarapoto S/S	36	Area Conservation Regional / Parque Nacional b.z.	
	6	Loreto	Contamana	98	84	140	52	15,200			48	3		Pucallpa S/S	143	Zona Reservada (direct use)	
1. Cajamarca-La Libertad	7	Cajamarca	Quilcate	2087	63	218	161	1,240			70	7		Cerro Corona S/S	47		
	8	Cajamarca	Cajamarca	2696	71	71	77	101			29	2		Cajamarca S/S	8	Coto de Caza (direct use)	
	9	Cajamarca-La Libertad	Huaranchal	1941	74	221	123	220			54	5		Cajamarca S/S	43	Coto de Caza (direct use)	
	10	La Libertad	Cachicadan	2855	70	204	83	841			40	3		Alto Chikama S/S	22		
2. Callejón de Huaylas	11	Ancash-La Libertad	Tablachaca	2586	50	220	76	353			29	5		Sihuas S/S	29		
	12	Ancash	Huancarhuas	2487	89	224	159	1,840			89	10		Kiman Ayllu S/S	36		
	13	Ancash	Chancos	2943	72	231	143	1,670	15.3		21	4	5	Huaraz S/S	30		
	14	Ancash	Olleros	3388	41	146	110	432			29	4		Conococha S/S	25	Parque Nacional (indirect use)	
	15	Huánuco-Ancash	Azulmina	3437	70	69	45	170			53	5		Conococha S/S	22		
3. Churín	16	Lima	Conoc	2538	49	93	55	290			21	3		Cahua S/S	11		
	17	Pasco	Huayllay	4220	50	-	-	21			10	1		Huánuco S/S	22		
	18	Pasco	Tambochaca	3408	60	226	118	673			24	2		Uchuchacua S/S	8		
	19	Lima	Oyon	3003	61	190	53	354			45	5		Paragsha 2 S/S	47		
	20	Lima	San José	3500	73	189	102	772			25	2		Carhuamayo S/S	47		
4. Central	21	Junín	Yauli	4100	41	206	108	623			7	1		Pomacocha S/S	11		
	22	Huancavelica	Coris	2000	50	221	128	1,880			10	1		Cobrizal S/S	18		
	23	Huancavelica	Nonobamba	3754	44	235	128	1,880			15	3		Ingenio S/S	22		
5. Eje Volcánico Sur	24	Cusco-Apurímac	Cconoc	2538	41	80	58	45,800			43	3		Abancay S/S	18	Santuario Histórico b.z. (indirect use)	
	25	Apurímac	Pincahuacho	3098	62	192	103	638			25	2		Cotaruse S/S	29		
	26	Apurímac	Antabamba	3628	43	223	136	498			15	2		Cotaruse S/S	36		
	27	Ayacucho	Puquio	4053	80	369	210	2,110	34.3		10	1	30	Cotaruse S/S	113		
	28	Ayacucho	Paila del Diablo	3814	81	169	119	1,400			54	4		Cotaruse S/S vía Pararca and Cotahuasi	36		
	29	Ayacucho	Pararca	2775	60	202	127	1,020			31	3		Cotaruse S/S vía Cotahuasi	72		
	30	Arequipa	Ocoruro	4475	85	-	-	-			23	1		Cotaruse S/S vía Antabamba	61	Reserva Paisajística (direct use)	
	31	Arequipa	Cotahuasi	2856	56	174	89	209			65	7		T-branch between Cotaruse S/S & Pararca	65	Reserva Paisajística (direct use)	
	32	Arequipa	Orcopampa	4029	55	54	32	66			29	4		Cotaruse S/S vía Ocoruro and Antabamba	33	Reserva Paisajística b.z. (direct use)	
	33	Arequipa	Cailloma	4278	58	148	87	1,280	9.1		26	3	5	Cailloma S/S	11		
	34	Arequipa	Coropuna	2986	51	235	70	237			15	3		Chuquibamba S/S	8		
	35	Arequipa	Chivay-Pinchollo	3776	93	208	132	2,740	162.9		136	10	150	Callalli S/S	70		
	36	Arequipa	La Calera	3943	35	186	56	734			9	2		Santuario S/S	8	Reserva Nacional (direct use)	
	37	Arequipa	Yura	2504	33	183	38	340			15	4		Yura S/S	8		
	38	Arequipa	Jesús	2655	37	209	50	1,330			7	2		Cerro Verde S/S	8		
	39	Moquegua	Ubinas	3077	62	91	56	704			24	3		Socabaya S/S	43		
	40	Moquegua	Ulucan	2734	80	243	145	7,260	27.4		0	1	25	Socabaya S/S			
	41	Moquegua	Calacoa-Putina	3300	91	186	118	1,340	108.2		45	5	100	Moquegua S/S	127		
	42	Moquegua	Ccollo/Titre	4330	83	217	167	11,400	39.7		27	4	35				
	43	Moquegua-Tacna	Crucero	4567	73	357	216	7,090	79.4		3	2	70		117		
	44	Tacna	Tutupaca	4268	86	215	112	897	113.8		29	6	105		22		
	45	Tacna	Calientes	4341	90	219	195	3,340	100		0	1	100		30	Area Conservation Regional	
	46	Tacna	Ancocollo	4216	87	219	206	2,380	98.2		55	5	90		22	Area Conservation Regional b.z.	
	47	Tacna	Borateras	4397	87	223	198	2,390	40		31	4	50			Area Conservation Regional	
	48	Tacna	Chungara-Kallapuma	4349	85	210	170	2,950	84		17	4	75	Moquegua S/S via A S/S	75	Area Conservation Regional	
	49	Cusco	Machu-Picchu	1924	52	211	129	2,260			49	6		Sururay S/S	22	Santuario Histórico (indirect use)	
50	Cusco	Choquecancha	3010	88	220	124	1,340			43	3		Dolorespata S/S	36			
51	Cusco	Pachanta-Marcapata	3529	64	192	105	565			40	3		Combapata S/S	54			
52	Cusco	La Raya	3754	52	189	109	4,090			26	5		Onocora S/S (2011)	29			
53	Puno	Ollachea	3313	70	191	113	576			45	3		San Rafael S/S	29			
54	Puno	Pasanoccollo	3906	75	172	106	982			65	6		Puno S/S	36			
55	Puno	Hatun Phutina	3724	71	179	109	139			39	4		Puno S/S via Putina	50			
56	Puno	Putina	3986	55	188	79	13,200			53	6		Puno S/S	43			
57	Puno	Chaqueylla	4100	57	119	70	11,300			26	3		Tintaya S/S	54			
58	Puno	Pinaya	4387	83	193	135	13,400	36.8		27	3	35	Callalli S/S	70			
59	Moquegua	Jesús María	3943	52	152	112	14,300	17.3		17	3	10	Puno S/S	67			
60	Moquegua	Exchage	3561	42	176	116	6,360			27	5		Socabaya S/S via Ubinas	22			
61	Puno	Collpa Apacheta	4013	54	153	61	48,600			13	2		Puno S/S	40			

Anexo 2 – Tablas termodinámicas del agua (temperaturas)

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, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		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
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

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, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Liq. sat., ν_f	Vapor sat., ν_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., 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.

Anexo 3 – Tablas termodinámicas del agua (presiones)

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Líqu. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Líqu. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Líqu. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _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

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, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		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

Anexo 4 – Propiedades del agua saturada

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P_{sat} kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía 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.

Anexo 5 – Ficha técnica Turbina de vapor WEG Línea CT / CTE

Turbinas de Vapor - Tecnología de Reacción

Línea CT / CTE

Condensación - Extracción



Características Técnicas

Potencia de salida nominal hasta 100 MW
Presión de admisión hasta 140 bar a
Temperatura de admisión hasta 540 °C
Rotación hasta 13.600 rpm
Presión de extracción hasta 45 bar a



Anexo 6 – Ficha técnica Bomba Goulds 3409 de 2725 m³/h

Fase múltiple/doble succión

Goulds 3409

Capacidad media

- Capacidades hasta 2725 m³/h | 12 000 GPM
- Cargas hasta 259 m (850 pies)
- Temperaturas hasta 120 °C (250 °F)
- Presión hasta 2758 kPa | 400 PSIG

Aplicaciones:

- Proceso – Agua de refrigeración, parte inferior del destilador, circulación por rehedor, torre de enfriamiento
- Pasta y papel – Limpiador primario y secundario, filtrado, bomba del ventilador de suministro de agua del molino, suministro Headbox, regadera
- Metales primarios – Agua de enfriamiento, refrigeración y lixiviación
- Municipal – Gran altura, baja altura, agua de lavaje, aguas residuales, agua cruda
- Generación de energía – Torre de enfriamiento, refrigeración de componentes, agua potable, represa de cenizas, drenaje del calentador
- Marina – Sentina y balasto, carga, agua de enfriamiento, bomba contra incendios
- General – Agua de río, salmuera, agua de mar

Materiales: Hierro/bronce fundido, íntegramente de hierro, hierro fundido/acero inoxidable, hierro fundido/Ni-Al-Br, íntegramente de acero inoxidable. Hay otros materiales disponibles a pedido. (1724 kPa)



NSF

Goulds 3410

Capacidad pequeña

- Capacidades hasta 1817 m³/h | 8000 GPM
- Cargas hasta 174 m (570 pies)
- Temperaturas hasta 177 °C | 350 °F
- Presión hasta 1724 kPa (250 PSIG)

Aplicaciones:

- Proceso – Agua de refrigeración, parte inferior del destilador, circulación por rehedor, torre de enfriamiento
- Pasta y papel – Limpiador primario y secundario, filtrado, regadera de suministro de agua del molino, bomba del ventilador
- Metales primarios – Agua de enfriamiento, refrigeración y lixiviación
- Municipal – Gran altura, baja altura, agua de lavaje, aguas residuales, agua cruda
- Utilidades – Torre de enfriamiento, refrigeración de componentes, agua potable
- Marina – Sentina y balasto, carga, agua de enfriamiento, bomba contra incendios

Materiales: Hierro/bronce fundido, íntegramente de hierro, hierro fundido/acero inoxidable, hierro fundido/Ni-Al-Br, íntegramente de acero inoxidable. Hay otros materiales disponibles a pedido. (1724 kPa)



NSF

Goulds 3420

Alta capacidad

- Capacidades hasta 14 762 m³/h | 65 000 GPM
- Cargas hasta 122 m (400 pies)
- Temperaturas hasta 135 °C (275 °F)
- Presión hasta 1379 kPa | 200 PSIG

Aplicaciones:

- Proceso – Agua de refrigeración, parte inferior del destilador, circulación por rehedor, torre de enfriamiento
- Pasta y papel – Limpiador primario y secundario, filtrado, bomba del ventilador de suministro de agua del molino, suministro Headbox, regadera
- Metales primarios – Agua de enfriamiento, refrigeración y lixiviación
- Municipal – Gran altura, baja altura, agua de lavaje, aguas residuales, agua cruda
- Generación de energía – Torre de enfriamiento, refrigeración de componentes, agua potable, represa de cenizas, drenaje del calentador
- Marina – Sentina y balasto, carga, agua de enfriamiento, bomba contra incendios
- General – Agua de río, salmuera, agua de mar

Materiales: Hierro/bronce fundido, íntegramente de hierro, hierro fundido/acero inoxidable, hierro fundido/Ni-Al-Br, íntegramente de acero inoxidable. Hay otros materiales disponibles a pedido. (1724 kPa)



NSF

Goulds 3498

Capacidad extraalta

- Capacidades hasta 18 000 m³/h | 80 000 GPM
- Cargas hasta 244 m (800 pies)
- Temperaturas hasta 135 °C (275 °F)
- Presiones de trabajo hasta 200 PSIG

Aplicaciones:

- Proceso – Agua de refrigeración, parte inferior del destilador, circulación por rehedor, torre de enfriamiento
- Pasta y papel – Limpiador primario y secundario, filtrado, bomba del ventilador de suministro de agua del molino, suministro Headbox, regadera
- Metales primarios – Agua de enfriamiento, refrigeración y lixiviación
- Municipal – Gran altura, baja altura, agua de lavaje, aguas residuales, agua cruda
- Generación de energía – Torre de enfriamiento, refrigeración de componentes, agua potable, represa de cenizas, drenaje del calentador
- Marina – Sentina y balasto, carga, agua de enfriamiento, bomba contra incendios
- General – Agua de río, salmuera, agua de mar

Materiales: Hierro/bronce fundido, íntegramente de hierro, hierro fundido/acero inoxidable, hierro fundido/Ni-Al-Br, íntegramente de acero inoxidable. Hay otros materiales disponibles a pedido. (1724 kPa)



NSF

Anexo 7 – Ficha técnica Intercambiador de calor Alfa Laval CP120

Design



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 the 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.

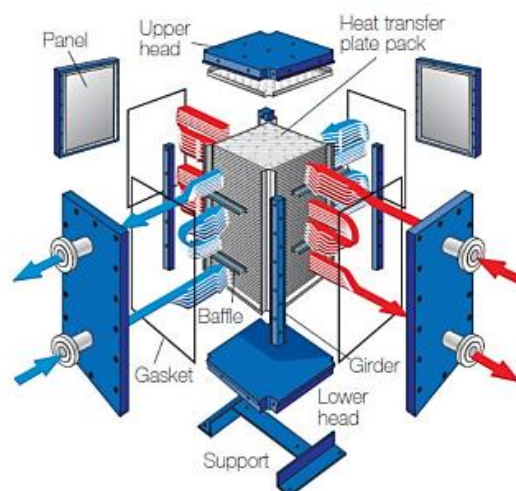
Learn more at www.alfalaval.com/compabloc

Technical data

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

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

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



The table below provides some inputs for our standard range.

Other conditions may be available on request.

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

* FV = Full Vacuum

** Standard maximum design conditions for ASME design

Compabloc

A proven solution for improving sustainability

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

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

Design temperature	400°C (752°F), down to -100°C (-148°F)
Design pressure	From full vacuum to 42 barg (600 psig)
Maximum heat transfer area	840 m ² (9,085 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 8 – Datos técnicos Electrolizador de 100 MW

Datos de partida

Instalación de producción de hidrógeno 100 MW



DATOS PARTIDA

Coste electricidad	40,00 €/MWh
Horas funcionamiento	8.760,00 h/año
CAPEX electrolizador	480,00 €/kW
Licencias instalación	40.000,00 €/MW
Canalizaciones Incluye parte eléctrica	3,50% CAPEX ELY
Obra civil, edificio atmosfera explosiva	20,00% CAPEX ELY
Nuevo Stack (todo el empaquetado sin el resto de sistemas de filtrado tuberías etc.	30,00% CAPEX ELY
Almacenamiento H2 (a 30 bares) como diapo 2	3,00% CAPEX ELY
Años amortización	20,00 años

DATOS TÉCNICOS ELECTROLIZADOR

Capacidad instalada	100,00 MW
Consumo eléctrico para alcalino	49,00 kWh/kg H2
Consumo elect. específico	4,41 kWh/Nm ³
Capacidad instalada de producción de hidrógeno al principio de la vida	2.040,82 Kg/h
Días disponibilidad anual	358,00 días/año
Días mantenimiento	7,00 días/año
Pérdidas eficiencia (datos de Green deal)	0,19% %/1000 h
Hidrógeno producido BOL	17.520.000 kg/año
Consumo eléctrico	858.480,00 MWh año
Mantenimiento	2% CAPEX ELY
Factor de disponibilidad	98%

