

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



**“Evaluación de la potencia efectiva generada con una central geotérmica
híbrida en el yacimiento Crucero, Moquegua”**

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

AUTORES:

Bach. Ulloa Tomas, Wilson Miguel
Bach. Chuquillanqui Guimaray, Arnold Eduardo

ASESOR:

Mg. Guevara Chinchayan, Robert Fabian
DNI 32788460
Código ORCID: 0000-0002-3579-3771

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2025

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



CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa de acuerdo a la denominación siguiente:

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN
ENERGÍA

**“EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA CON UNA CENTRAL
GEOTERMICA HIBRIDA EN EL YACIMIENTO CRUCERO, MOQUEGUA”**

AUTORES :

Bach. Ulloa Tomas, Wilson Miguel
Bach. Chuquillanqui Guimaray, Arnold Eduardo

Mg. Robert Fabian Guevara Chinchayan
Asesor
DNI 32788460
Código ORCID 0000-0002-3579-3771

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



CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente Jurado Evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en cumplimiento del objetivo propuesto y presentado con forme al Reglamento General para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa, titulado:

**“EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA CON UNA CENTRAL
GEOTÉRMICA HÍBRIDA EN EL YACIMIENTO CRUCERO, MOQUEGUA”**

AUTORES:

Bach. Ulloa Tomas, Wilson Miguel
Bach. Chuquillanqui Guimaray, Arnold Eduardo

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:


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


Dr. Aranguri Cayetano, Denis Javier
SECRETARIO
DNI: 42009679
CÓD. ORCID: 0000-0002-6119-2072


Mg. Guevara Chinchayán, Robert Fabian
INTEGRANTE
DNI: 32788460
CÓD. ORCID: 0000-0002-3579-3771



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 a.m., del día viernes 25 del mes de abril del año dos mil veinticinco, en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 866-2024-UNS-CFI** de fecha 20.12.24, integrado por los siguientes docentes:

- Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo : Presidente
- Dr. Denis Javier Arangurí Cayetano : Secretario
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Integrante

Y según la **Resolución Decanal N°148-2025-UNS-FI de fecha 22.04.25.**, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **“EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA CON UNA CENTRAL GEOTÉRMICA HÍBRIDA EN EL YACIMIENTO CRUCERO, MOQUEGUA”**, perteneciente a los bachilleres: **CHUQUILLANQUI GUIMARAY ARNOLD EDUARDO con código de matrícula N°201711046** y **ULLOA TOMAS WILSON MIGUEL código de matrícula N°0201711006**, teniendo como asesor al docente **Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán**, según Resolución Decanal N°799-2023-UNS-FI de fecha 13.11.23.

Terminada la sustentación del bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
CHUQUILLANQUI GUIMARAY ARNOLD EDUARDO	Dieciocho (18)	BUENO

Siendo las 11:30 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo
PRESIDENTE


Dr. Denis Javier Arangurí Cayetano
SECRETARIO


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
INTEGRANTE



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 a.m., del día viernes 25 del mes de abril del año dos mil veinticinco, en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 866-2024-UNS-CFI** de fecha 20.12.24, integrado por los siguientes docentes:

- Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo : Presidente
- Dr. Denis Javier Arangurí Cayetano : Secretario
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Integrante

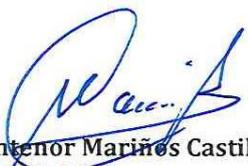
Y según la **Resolución Decanal N°148-2025-UNS-FI de fecha 22.04.25.**, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **“EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA CON UNA CENTRAL GEOTÉRMICA HÍBRIDA EN EL YACIMIENTO CRUCERO, MOQUEGUA”**, perteneciente a los bachilleres: **CHUQUILLANQUI GUIMARAY ARNOLD EDUARDO** con código de matrícula N°201711046 y **ULLOA TOMAS WILSON MIGUEL** código de matrícula N°0201711006, teniendo como asesor al docente **Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán**, según Resolución Decanal N°799-2023-UNS-FI de fecha 13.11.23.

Terminada la sustentación del bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ULLOA TOMAS WILSON MIGUEL	DIECIOCHO (8)	BUENO

Siendo las 11:30 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Dr. Gualberto Antenor Mariños Castillo
PRESIDENTE


Dr. Denis Javier Arangurí Cayetano
SECRETARIO


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
INTEGRANTE



Recibo digital

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

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Arnold Chuquillanqui
Título del ejercicio: INFORMES
Título de la entrega: EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA CON UNA...
Nombre del archivo: TESIS_-_ULLOA_Y_CHUQUILLANQUI--.pdf
Tamaño del archivo: 8.67M
Total páginas: 125
Total de palabras: 27,283
Total de caracteres: 141,001
Fecha de entrega: 27-may.-2025 08:19p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2506707905

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADEMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN
ENERGIA



"EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA
CON UNA CENTRAL GEOTÉRMICA HÍBRIDA EN EL
YACIMIENTO CRUCERO, MOQUEGUA"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERIA
EN ENERGÍA

AUTORES:
Bach. CHUQUILLANQUI GUIMARAY, Arnold Eduardo
Bach. ULLOA TOMAS, Wilson Miguel

ASESOR:
Mg. GUEVARA CHINCHAYAN, Robert Fabian
DNI 32788460
Código ORCID: 0000-0002-3579-3771

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ
2024

EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA GENERADA CON UNA CENTRAL GEOTÉRMICA HÍBRIDA EN EL YACIMIENTO CRUCERO, MOQUEGUA

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	18%	1%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	5%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repository.unab.edu.co Fuente de Internet	1%
5	repositorio.ingemmet.gob.pe Fuente de Internet	1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	1%
7	idoc.pub Fuente de Internet	1%
8	dokumen.pub Fuente de Internet	1%
9	cicese.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1%
10	riull.ull.es Fuente de Internet	<1%
11	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Le dedico este proyecto a mi madre Azucena Tomas, por haber confiado en mí y haber invertido en mi educación para poder llegar a este momento, a mi padre putativo Guillermo Liñán, por sus palabras en momentos difíciles en donde necesite un apoyo emocional y a mi hermana Katherine Ulloa, por haberme enseñado que siempre es importante un momento de relajo ante tanto trabajo para un buen estado de salud mental.

W.M.U.T.

El presente trabajo de tesis está dedicado a mis padres Elizabeth y Amaro, quienes son los pilares fundamentales en mi vida, me han brindado su amor y su apoyo incondicional en cada momento difícil que he podido enfrentar, han hecho de mí una persona perseverante y constante lo que me ha permitido llegar a la etapa final de mi vida universitaria. A mi hermana Fátima, por su cariño y alegrar mis días con sus ocurrencias, por enseñarme a ser un buen hermano y una buena persona. Por último, a mis abuelas, primos y tíos quienes siempre han estado presentes y me han cuidado y guiado con sus sabios consejos.

A.E.C.G.

RECONOCIMIENTO

Agradecer a Dios por habernos permitido llegar hasta este punto de nuestras vidas sin ningún tipo de inconveniente.

Agradecer a nuestro asesor Mg. Robert Guevara Chinchayan por la paciencia y esmero en la guía y el desarrollo de este proyecto.

Agradecer a nuestros docentes por lo inculcado en la universidad, lo cual nos ha permitido forjar este proyecto.

Agradecer también a nuestros compañeros de la promoción 2017, que en los 6 años que estuvimos juntos, fueron una segunda familia para nosotros.

Atentamente,

W.M.U.T

A.E.C.G.

INDICE GENERAL

INDICE

RESUMEN

I.	INTRODUCCION	
1.1	Realidad Problemática	1
1.2	Antecedentes	1
1.3	Justificación	5
1.4	Hipótesis	6
1.5	Objetivos	6
II.	MARCO TEÓRICO	
2.1	Energía renovable	7
2.2	Origen de los sistemas geotermales	9
2.3	Energía geotérmica	11
2.4	Antecedentes históricos del aprovechamiento de recursos geotérmicos	11
2.5	Recursos geotérmicos en el Perú	12
2.6	Uso de los recursos geotérmicos del Perú	13
2.7	La energía geotérmica en el mundo	14
2.8	Costos de la energía geotérmica	16
2.9	Estructura de un sistema geotérmico convencional	18
2.10	Clasificación de sistemas geotérmicos	18
2.11	Etapas en la exploración de un reservorio	21
2.12	Tipos de centrales geotérmicas	23
2.13	Ciclo Rankine	27
2.14	Ciclo Rankine orgánico	29
2.15	Marco legal de energía geotérmica	32
2.16	Energía geotérmica, contaminación y corrosión	34
2.17	Propiedades de los fluidos ORC utilizados en una central geotérmica	35
III.	MATERIAL Y MÉTODO	
3.1	Material	37
3.2	Método	37
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1	Caracterización del recurso geotérmico en la localidad de Crucero	57
4.2	Datos de partida	58
4.3	Evaluación de criterios para la optimización de parámetros	58
4.4	Fluidos CRO evaluados	65
4.5	Comparación de desempeño energético en los fluidos CRO	65
4.6	Evaluación económica	70
4.7	Discusión de resultados	77
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1	Conclusiones	79
5.2.	Recomendaciones	80
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
VII.	ANEXOS	84

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución superficial de las placas litosféricas	10
Figura 2 Mapa geotérmico del Perú	13
Figura 3 Central geotérmica de vapor seco	23
Figura 4 Central geotérmica tipo flash	24
Figura 5 Central geotérmica binaria	25
Figura 6 Central geotérmica single flash binario básica	26
Figura 7 Central geotérmica single flash binario integrado	27
Figura 8 Propiedades de seguridad de refrigerantes más comunes	35
Figura 9 Esquema de turbina de vapor	40
Figura 10 Diagrama T-Q cuando el fluido caliente es vapor	42
Figura 11 Esquema evaporador y precalentador Loop binario 1	42
Figura 12 Esquema turbina y torre de refrigeración del Loop binario 1	44
Figura 13 Esquema bomba del Loop binario 1	44
Figura 14 Diagrama T-Q cuando el fluido caliente es líquido	46
Figura 15 Esquema evaporador-precalentador Loop binario 2	46
Figura 16 Esquema del condensador refrigerado por aire CRA	49
Figura 17 Circulación de fluidos en la zona geotermal de Crucero, Moquegua	57
Figura 18 Potencia neta del Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape variables	59
Figura 19 Calor suministrado al Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape en la turbina de vapor	60
Figura 20 Eficiencia térmica del isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape en la turbina de vapor	61
Figura 21 Consumo específico de Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape en la turbina de vapor	62
Figura 22 Potencia neta de los fluidos ORC evaluados a distintas temperaturas T2	66
Figura 23 Eficiencia térmica de los fluidos ORC evaluados a distintas temperaturas T2	67
Figura 24 Eficiencia de utilización de los fluidos ORC evaluados a distintas temperaturas T2	68
Figura 25 Consumos específicos de fluido CRO y potencia neta generada	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Capacidad instalada de energía geotérmica en el mundo	15
Tabla 2 Clasificación de reservorios geotérmicos hidrotermales	19
Tabla 3 Parámetros intervinientes	28
Tabla 4 Propiedades de refrigerantes R	36
Tabla 5 Propiedades del refrigerante N- Hexano	36
Tabla 6 Propiedades del refrigerante Hexametildisiloxano	36
Tabla 7 Procesos experimentados por el fluido geotérmico en el ciclo flash	50
Tabla 8 Procesos experimentados por el fluido refrigerante en el Loop binario 1	50
Tabla 9 Procesos experimentados por el fluido refrigerante en el Loop binario 2	50
Tabla 10 Datos de partida	58
Tabla 11 Parámetros optimizados	63
Tabla 12 Balance energético de Isopentano	64
Tabla 13 Temperatura y presión crítica de los refrigerantes de estudio	65
Tabla 14 Resultados de desempeño energético para cada fluido CRO evaluado	68
Tabla 15 Etapas de construcción para la inversión	71
Tabla 16 Costos anuales	72
Tabla 17 Precios de barra de la Sub. Estación Moquegua 138 KV	72
Tabla 18 Precios de barra de a Sub Estación Moquegua 138KV expresados en USD	73
Tabla 19 Detalle por venta de energía y potencia	73

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar los indicadores de desempeño energético al realizar la implementación de una central geotérmica flash binario integrada en la localidad de Crucero, para ello se ha realizado la comparación de diversos refrigerantes con la finalidad de obtener al refrigerante con mejor desempeño para operar en la central evaluada. Por último, se realiza la evaluación económica del proyecto considerando costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, ingresos por venta de potencia y energía e ingresos por CO2 dejados de emitir.

Se obtuvo como resultado que el Isopentano es el refrigerante de mejor desempeño energético generando una potencia de 6.555 MW, una eficiencia térmica de 20.507%, una eficiencia de utilización de 52.511% un consumo específico de refrigerante de 38686.566 kg/MWh, además de ser un refrigerante no corrosivo y uno de los que menor impacto ocasiona en comparación a los otros evaluados.

En la evaluación económica se determinó una inversión inicial de 21 361 996 USD para la central geotérmica, un VAN de - 4 094 501 USD, y un TIR de 9.14%, lo cual nos indica un periodo de retorno de inversión de 9 años con 3 meses, lo que demuestra la no viabilidad económica del proyecto, pero puede serlo mediante subvenciones económicas por parte del estado.

PALABRAS CLAVES: Central geotérmica flash binaria integrada, desempeño energético, recurso geotérmico.

ABSTRACT

The purpose of this research work is to evaluate the energy performance indicators when implementing an integrated binary flash geothermal power plant in the town of Crucero. To this end, a comparison of various refrigerants has been carried out in order to obtain the refrigerant with the best performance to operate in the evaluated plant. Finally, the economic evaluation of the project is carried out considering investment costs, operation and maintenance costs, income from the sale of power and energy and income from CO₂ not emitted.

The result was that Isopentane is the refrigerant with the best energy performance, generating a power of 6,555 MW, a thermal efficiency of 20.507%, a utilization efficiency of 52.511%, a specific refrigerant consumption of 38686.566 kg/MWh, in addition to being a non-corrosive coolant and one of the ones that causes the least impact compared to the others evaluated.

In the economic evaluation, an initial investment of 21,361,996 USD was determined for the geothermal power plant, an VAN of - 4,094,501 USD, and an TIR of 9.14%, which indicates a return on investment period of 9 years with 3 months, which demonstrates the economic non-viability of the project, but it can be done through economic subsidies from the state.

KEYWORDS: Integrated binary flash geothermal power plant, energy performance, geothermal resource.

I. INTRODUCCION

1.1. Realidad problemática

A lo largo de los años la energía eléctrica se ha convertido en un elemento indispensable en la vida de los seres humanos, debido a que ha permitido la simplificación de tareas en las actividades cotidianas, el avance tecnológico y el desarrollo económico y social del país, sin embargo, gran parte de esta energía es generada en base a combustibles fósiles el cual representa un recurso no renovable, pero sobre todo, altamente contaminable. Desde este punto surge la necesidad de buscar alternativas de generación de energía en base a fuentes más limpias y sobre todo que puedan sostenerse en el tiempo.

Diversos estudios señalan que la región Moquegua cuenta con un gran potencial para la generación de energía eléctrica mediante la utilización de recursos geotérmicos, en esta región se han determinado 6 zonas de aprovechamiento para futuros proyectos, siendo una de las principales, la localidad de Crucero, cuyos reservorios geotérmicos se encuentran por encima de los 200 °C, a pesar de que los estudios fueron realizados ya hace muchos años atrás, hasta el momento no ha podido implementarse ninguna central geotérmica en la región, ni en el país.

En América Latina, tampoco hay mucho avance en este tipo de tecnología, los únicos países en donde las centrales geotérmicas representan un porcentaje importante en su producción eléctrica total, son Nicaragua (17%); Filipinas (16.2%); El Salvador (15.4%); Islandia (13%); Costa Rica (7.8%); Kenia (5.3%); Nueva Zelanda (5.1%) e Indonesia con 3%.

Muchas de las razones por las cuales no ha podido fomentarse este tipo de tecnología en el país están relacionadas principalmente a la falta de políticas y apoyo gubernamental, a la falta de tecnología adecuada, los costos iniciados elevados y a la falta de estudios profundos para buscar maneras de aprovechar esta fuente, por esa razón en el presente trabajo se realiza una evaluación del recurso geotérmico en la localidad de Crucero y se propone su aprovechamiento mediante la implementación de una central flash híbrida binaria integrada.

1.2. Antecedentes

Medina & Guillen , (2018) en su trabajo de investigación, “Diseño de una central geotérmica de 100 MW desde la generación de energía eléctrica hasta su transmisión a la subestación eléctrica Montalvo de la ciudad de Moquegua y

aprovechamiento cogenerativo para desarrollo sostenible”, plantearon el dimensionamiento de una central single Flash y binario para la generación de energía eléctrica. En primera instancia, analizaron el potencial geotérmico de la zona de Calacoa centrándose principalmente en los sectores de Putina y Secoalaque, posteriormente estimaron parámetros de operación para los cálculos, obteniendo como resultados una eficiencia de utilización de 38.62% y 43.4% para las temperaturas de 230 °C y 250 °C de las áreas de Putina y Secoalaque respectivamente. Por último, se determinó una inversión total de 275.8 millones y un TIR de 14.17% evaluado en un periodo de 25 años, de lo que concluyó que la ejecución del proyecto es factible.

Pulido, (2017) en su trabajo de investigación, “Estudio y diseño preliminar de una planta de generación eléctrica a partir de energía geotérmica en la isla de Tenerife”, realizó la comparación de distintas tecnologías de aprovechamiento geotérmico (doble flash, ciclo binario y flash binario). Inicialmente, caracterizó el recurso geotérmico en la zona, estimando una temperatura de 250 °C y un flujo másico extraíble de 56 kg/s. Posteriormente mediante una hoja de cálculo determinó que la central flash binaria genera una potencia efectiva de 6.88 MW y una eficiencia de utilización del 47.15%, lo que la convierte en la mejor opción en términos de potencia generada, sin embargo, los costos de inversión son más elevados en comparación con los otros dos tipos de tecnologías evaluadas.

Villarino, (2020) en su trabajo de investigación “Diseño de una central geotérmica de 60 MW usando el software C.O.C.O.”, realizó cálculos termodinámicos para comparar distintos tipos de tecnologías (flash simple, flash doble, combinado flash simple y doble e híbrido flash y binario). En primera instancia, caracterizó al recurso geotérmico con una temperatura de 223 °C, posteriormente, procesó los datos en el software de simulación C.O.CO, obteniendo como resultado que el sistema flash binario híbrido es el más eficiente y que para generar una potencia de 63 MWe es necesario un flujo másico geotermal de 144.99 kg/s, además, seleccionó al isopentano como fluido de trabajo dentro del proceso binario debido a sus propiedades termodinámicas. Por último, efectuó una evaluación económica del proyecto, considerando costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, concluyendo que el proyecto es viable si se obtiene un apoyo económico por parte del estado.

Pinedo & Ramirez , (2015) en su trabajo de investigación “Análisis y evaluación del potencial geotérmico para su aprovechamiento mediante una central de ciclo binario para generación de potencia eléctrica en la región Corongo-Ancash, Perú”, realizó una evaluación técnica y económica para justificar la sostenibilidad de una central geotérmica binaria. Mediante fuentes bibliográficas caracterizó al fluido geotérmico con una temperatura de 270 °C y un flujo másico extraíble de 15 kg/s. En segunda instancia, efectuó cálculos termodinámicos para optimizar los parámetros de diseño de la central y posteriormente realizar la comparación de distintos fluidos de trabajo secundario, con lo que concluyó que al utilizar isopentano se obtiene una potencia efectiva de 4.1 MW y una eficiencia de planta de 20%, por lo que el isopentano, representa la mejor opción en términos de potencia generada y debido a su bajo factor de emisión de contaminantes. En última instancia realizó la evaluación económica del proyecto, estimando una inversión inicial de 16 millones de dólares y un periodo de recuperación de la inversión de 18.67 años, por lo determinó que el proyecto es rentable con subvenciones económicas por parte del estado peruano.

Valverde, (2023) en su trabajo de investigación “Diseño y optimización de una central geotérmica de expansión flash”, realizó cálculos energéticos de una central geotérmica flash simple - flash doble y posteriormente adicionó la configuración de un ciclo binario simple y un regenerativo, para ello optimizó las presiones a las que se realizará cada una de las expansiones para maximizar el trabajo en la configuración flash y seleccionó el mejor refrigerante en la configuración binaria. Obtuvo como resultado para el sistema flash simple, (una presión de expansión de 3 bar y un rendimiento de 14.1 %), para el flash doble, (unas presiones de expansión de 7 bar y 1.21 bar respectivamente y un rendimiento del 15.5%), adicionando la configuración de un ciclo binario simple se obtiene un rendimiento del 16.64%, y adicionando la configuración de un ciclo binario regenerativo se obtiene un valor de 16.88%, siendo este último el modelo más eficiente.

Bulnes, (2018) en su trabajo de investigación “Dimensionamiento y selección de una central geotérmica basada en el ciclo Rankine orgánico ubicada en el yacimiento geotérmico Jesús María - Moquegua”, realizó la evaluación técnica y económica para implementar una central geotérmica en el yacimiento Jesús María. De forma preliminar y por medio de referencias bibliográficas asumió la temperatura del fluido geotermal en 150 °C, posteriormente fijó una potencia generada total de 4.5 MW, efectuó cálculos

termodinámicos y obtuvo como resultado que para generar dicha potencia es necesario la extracción total de 101.1 kg/s de fluido geotermal dividido en dos pozos de producción; además, seleccionó al isobutano como fluido de trabajo secundario obteniendo una eficiencia de planta de 11.7%. Finalmente realizó la evaluación económica del proyecto estimando una inversión inicial de S/ 56 millones de soles con un VAN de S/60 694 413 millones de soles y un TIR de 12%, lo que indica que el proyecto es factible, rentable y atractivo para la inversión.

Rupérez, (2017) en su trabajo de investigación “Estudio termoeconómico para la implantación de centrales geotérmicas de generación eléctrica operadas con CO₂ supercrítico”, realizó la comparación entre un sistema de ciclo Brayton Simple y Brayton con regeneración para aprovechar los yacimientos de la región de Galicia en España. Como punto de partida fijó la temperatura de extracción del CO₂ en 204 °C, como siguiente paso mediante modelos matemáticos y analizando el agotamiento térmico del yacimiento, determinó que al evaluar el proyecto en un horizonte de 15 años, el flujo de CO₂ máximo extraíble es de 1088 kg/s en el ciclo Brayton simple lo que genera una potencia de 45.59 MW y una eficiencia de planta de 12.2%, mientras que en el ciclo con regeneración el flujo es de 1607 kg/s obteniendo 68.09 MW y una eficiencia de 17.8%. Finalmente el proyecto presentó una inversión inicial de 241.86 M€ y 262.67 M€ para la central Brayton simple y con regeneración respectivamente, además en ambos casos luego de evaluar el VAN y el TIR, concluyó que el proyecto no es rentable debido al alto coste de operación.

Peralta & Miranda, (2017) en su trabajo de investigación “Análisis de estudio de la energía geotérmica de las aguas termales de Putina empleando isobutano para la generación de energía eléctrica para la localidad de Putina”, realizaron una investigación descriptiva para definir la factibilidad del aprovechamiento de aguas termales de Putina. En primera instancia caracterizaron el yacimiento con una temperatura de 62 °C, debido a la baja entalpia del recurso optó por diseñar una central geotérmica binaria, posteriormente mediante hojas de cálculo obtuvo que la central genera una potencia de 42.31 kW y tiene una eficiencia de planta de 15.56%. Finalmente señala que los costos de inversión y la tarifa de generación de energía eléctrica son altos en comparación a otras fuentes de energía renovable.

Tranamil , (2019) en su trabajo de investigación “Evaluación termodinámica y económica de la integración de un campo solar de concentración a una central geotérmica emplazada en el norte de Chile”, realizó el estudio de diversas estrategias de integración de un campo solar de colectores cilíndricos parabólicos a una planta geotérmica binaria, para ello en sus cálculos intentó mantener los parámetros de operación del ciclo orgánico, obteniendo como resultado una potencia térmica del campo solar de 30 MW y una potencia neta de 36 MW, considerando el ciclo binario, conjuntamente la eficiencia exergética del ciclo geotérmico solar varía entre un 38% y un 40%.

Flores , (2016) en su trabajo de investigación “Estudio de optimización exergética y termodinámica de una central geotérmica en Pampa Apacheta”, realizó un modelo termodinámico utilizando EES para calcular la potencia generada en una central de ciclo combinado de expansión súbita binaria. Probó la validez de su modelo introduciendo los parámetros de operación de la planta geotérmica Miravalles de Costa Rica y obtuvo que su algoritmo presenta un error menor al 1% en el cálculo de la potencia generada. Posteriormente evaluó el aprovechamiento del recurso geotérmico de Pampa Apacheta cuya temperatura de reservorio era de 250 °C y obtuvo que al extraer 514 kg/s se puede generar 48 MW, además escogió al isopentano como fluido de trabajo del ciclo binario. Por último evaluó económicamente el proyecto estimando un costo de inversión de 320 MMUSD considerando costos de exploración, montaje de la central y transmisión eléctrica.

1.3. Justificación

La investigación se justifica en los siguientes aspectos:

a. Ámbito ambiental:

El desarrollo de la energía geotérmica, implica la no dependencia a energías no renovables, lo que conllevaría una mayor atención a tecnologías menos contaminantes y duraderas.

b. Ámbito económico:

La generación de energía eléctrica, se da mediante un combustible de la naturaleza que es renovable, lo que conllevaría a un menor gasto de operaciones en el desarrollo de este tipo de tecnologías, muy diferente en comparación con las tecnologías convencionales (termoeléctricas), que necesitan de agua en grandes cantidades (fluido no renovable) para su funcionamiento.

c. Ámbito técnico:

La diferencia con respecto a funcionamiento entre una central geotérmica y una central termoeléctrica, es prácticamente nula, siendo la única diferencia, la fuente de calor, debido a esto los flujos residuales de una central geotérmica también pueden tener distintos usos.

1.4. Hipótesis

Mediante una evaluación energética de la potencia efectiva generada, el pentano es el fluido energético de mejor desempeño a través de una central geotérmica híbrida en el Yacimiento Crucero, Moquegua.

1.5. Objetivos

Objetivo general

Realizar la evaluación de la potencia efectiva generada con una central geotérmica híbrida en el Yacimiento Crucero, Moquegua.

Objetivos específicos

- Identificar las características energéticas de aprovechamiento del recurso geotermal de Crucero en Moquegua.
- Determinar la potencia efectiva generada en una central geotérmica híbrida con diversos refrigerantes.
- Seleccionar la central geotérmica híbrida con el mejor desempeño energético aprovechando el yacimiento Crucero.
- Realizar una evaluación económica de la central geotérmica híbrida con mejor desempeño.

II. MARCO TEORICO

2.1. Energía renovable

2.1.1. Definición de energía renovable

(Barrón et al., 2021), sostienen que, el uso creciente de fuentes de energía renovables se ha convertido en un tema de mucho interés en los últimos años. Éstas proceden de recursos naturales ilimitados y, al no producir residuos, no dañan el medio ambiente.

Por ello, su utilización es esencial para elevar el nivel de la energía utilizada en Perú. La energía derivada de recursos naturales ilimitados, como el agua, la luz solar y el viento, se conoce como energía renovable. Éstas se clasifican en función de cómo se utilizan en fuentes de energía renovables no convencionales y convencionales.

Las grandes centrales hidroeléctricas se consideran energías renovables convencionales. La energía solar fotovoltaica, la solar térmica, la eólica, la biomasa y las pequeñas centrales hidroeléctricas son ejemplos de energías renovables no convencionales.

2.1.2. Fuentes de energía renovable

(Barrón et al., 2021), aclaran que las fuentes de energía renovable son la biomasa o biogás, la geotérmica, la eólica, la solar, la hidráulica y la mareomotriz. Las fuentes de energía más utilizadas en Perú son la solar, la eólica, la biomasa y la hidroeléctrica; esta última es la más utilizada y representó el 54% de la producción total de energía de Perú en 2013.

El orden jerárquico que posee Perú en fuentes de energía renovable que más auge han tenido en los últimos años son:

La energía solar, que se obtiene de la radiación solar. Ésta se capta de diversas formas para utilizarla en paneles solares o elementos arquitectónicos bioclimáticos.

La energía eólica, que se obtiene mediante palas oblicuas impulsadas por el viento y unidas por un eje giratorio. Actualmente, Perú cuenta con cinco parques eólicos operativos.

La biomasa, que convierte el carbono almacenado en forma de combustible en electricidad, calor o combustibles de origen vegetal. Calor, electricidad, vapor de agua caliente y combustibles son los principales subproductos de este tipo de energía.

También a través de Camisea LNG, que ha producido un cambio significativo en el Perú hacia el uso de energía de biomasa o biogás. El uso de estos combustibles contemporáneos se ha extendido y se han sustituido los combustibles fósiles contaminantes, lo que ha contribuido a reducir las emisiones de CO₂ en los últimos años.

Por último, la energía hidroeléctrica que aprovecha el movimiento de los ríos para generar electricidad. En Perú hay más de 110 centrales hidroeléctricas.

2.1.3. Beneficios de la energía renovable

(Barrón et al., 2021), informan que, el objetivo primordial de todas estas fuentes de energía es proteger el medio ambiente, de ahí que sea crucial que se utilicen en todo el mundo. Como las energías renovables no producen gases de efecto invernadero, contribuyen a la lucha contra el cambio climático.

A diferencia de las fuentes tradicionales, estas energías no tienen límites, lo que permite el desarrollo gradual de un sistema energético sostenible frente a los sistemas existentes, siempre necesitados de nuevos recursos contaminantes.

Además, como las energías renovables pueden planificarse en un entorno menos imprevisible y son independientes de las condiciones económicas nacionales, resultan más rentables a largo plazo. También se ha observado que las energías renovables producen más puestos de trabajo que las fuentes convencionales y son más aceptables socialmente.

Estas fuentes de energía aumentarán significativamente en los próximos años, ya que se prevé que el uso de fuentes de energía renovables supondrá un beneficio de 17.200 millones de dólares en 2050.

Dado que la energía eólica tiene el potencial de acidificar los ecosistemas, también tiene la ventaja de no emitir ningún compuesto peligroso o contaminante. También tiene una de las huellas de consumo de agua más bajas y no contamina ningún tipo de agua, lo cual es ventajoso en estos días en que el agua se está convirtiendo en un recurso cada vez más limitado.

Por el contrario, una de las principales ventajas del biogás es su replicabilidad, independientemente de la ubicación de la instalación industrial. Por estas razones, no es necesario desarrollar centrales convencionales o nucleares de grandes dimensiones.

Una de las principales ventajas de la energía solar es que no produce contaminación acústica y reduce drásticamente la contaminación atmosférica. Además, disminuye el uso de combustibles y reduce enormemente la degradación de los ecosistemas.

Por último, como la energía hidroeléctrica puede generarse en el país, disminuye la dependencia de la energía importada, que es una de sus mayores ventajas. También demuestra que esta forma de energía tiene la ventaja de la flexibilidad y controla los flujos de agua que producen energía. Es limpia, no genera residuos y es duradera.

2.2. Origen de los sistemas geotermales

(Peralta & Miranda , 2017), mencionan que, tres capas concéntricas componen la Tierra: la más externa, denominada corteza, tiene menos de 10 km de espesor en los océanos y unos 35 km bajo los continentes, a continuación a unos 2.900 km de profundidad, se encuentra el manto ultrabásico, seguido del núcleo, que se considera metálico.

Sin duda, el planeta es una entidad dinámica propensa a enormes cambios y transformaciones. Los continentes están en constante movimiento y el fondo de los océanos en expansión.

Las dorsales oceánicas son vastas cordilleras submarinas formadas por erupciones volcánicas. La corteza oceánica se forma a partir de materiales fundidos que ascienden por una fosa o grieta que se ensancha constantemente en el centro de las dorsales.

A lo largo de su estructura continua, que abarca más de 50.000 km, las dorsales oceánicas centrales son escenario frecuente de erupciones volcánicas y terremotos. En el fondo oceánico se encuentran las vastas, estrechas y larguísimas depresiones conocidas como fosas abisales. Estos túneles tienen más de 6000 metros de profundidad. Está asociada a los arcos insulares, que han formado recientemente cadenas montañosas y una intensa actividad volcánica. Cabe mencionar que las dorsales oceánicas medias están divididas en segmentos desplazados entre sí por grandes fallas conocidas como fallas de transformación que las atraviesan transversalmente.

La teoría conocida como Tectónica de Placas se desarrolló como resultado de la comprensión de estas estructuras. Postulaba que un número limitado de placas en constante movimiento componen el manto terrestre, que es la región más extrema del

Se cree que los grandes movimientos de materia, conocidos como corrientes de convección, provocados por las variaciones de sus densidades a altas temperaturas, la energía liberada durante la desintegración radiactiva de algunos elementos del interior de la Tierra y el calor liberado durante los cambios de fase de los materiales del manto son las fuerzas impulsoras del movimiento de las placas.

2.3. Energía geotérmica

La energía geotérmica es el calor emitido por el núcleo de la Tierra y transportado a la superficie por el vapor o el agua. Según sus características, la energía geotérmica puede utilizarse para calentar edificios o generar electricidad limpia. La producción de energía eléctrica requiere recursos de entalpía alta o media, que suelen encontrarse en regiones donde las placas tectónicas están activas. (Secretaría de gobierno de energía, 2019)

2.4. Antecedentes históricos del aprovechamiento de recursos geotérmicos

De acuerdo a (INGEMMET, 2019), una de las primeras fuentes de energía que ha utilizado el ser humano es la energía geotérmica. El hecho de que muchas culturas hayan seguido utilizando el agua geotérmica con fines ceremoniales y terapéuticos, así como para cocinar, calentarse, bañarse y lavar la ropa, sugiere que la energía geotérmica ha sido muy apreciada en la vida humana desde hace mucho tiempo.

Las pruebas arqueológicas indican que los nativos americanos, que consideraban las regiones geotérmicas lugares sagrados y curativos, utilizaron la energía geotérmica por primera vez, hace unos 10.000 años. Los romanos, griegos, turcos, mexicanos y japoneses utilizaban el agua geotérmica con fines médicos y de higiene personal.

El pueblo maorí de Nueva Zelanda lleva generaciones utilizando la energía geotérmica para cocinar. La calefacción geotérmica se emplea en Pompeya, Francia y España. La balneología, que floreció en el Imperio Romano y en la cultura europea desde el siglo XVIII hasta la actualidad, es el resultado de los marcados hábitos ancestrales de uso de la geotermia que han existido en todo el mundo. Ha atraído y brindado oportunidades para el comercio, la diplomacia y la interacción cultural.

Con los avances tecnológicos del siglo XIX, la energía geotérmica empezó a explotarse en entornos industriales. Se atribuye al francés François Larderel el inicio del sector geotérmico. En lugar de quemar madera, empleó líquidos en un proceso de evaporación, que es como se define actualmente la energía geotérmica. Larderello alcanzó el éxito comercial con su generación de electricidad.

Cuando la potencia geotérmica instalada alcanzó los 127.650 kWe en 1942, muchos otros países adoptaron rápidamente el modelo italiano. Los primeros pozos geotérmicos de Japón se perforaron en Beppu en 1919. Después, en 1921, se perforaron pozos en El Tatio (Chile) y The Geysir (California, EE UU). En 1958 se puso en servicio una modesta central geotérmica en Nueva Zelanda, seguida de otra en México en 1959, Estados Unidos en 1960 y otros países en los años siguientes.

La energía geotérmica puede generar electricidad limpia y renovable. En Islandia, el 85% de las necesidades eléctricas del país se cubren con unidades geotérmicas. Alemania, Australia, Costa Rica, China, El Salvador, Estados Unidos, Filipinas, Guatemala, Indonesia, Italia, Japón, Kenia, México, Nicaragua, Nueva Zelanda, Portugal, Rumanía, Rusia, Turquía, Inglaterra, etc., son algunos de los países que generan energía geotérmica en todo el mundo. En 2015 se instalaron 12.635 GW de energía geotérmica en todo el mundo.

2.5. Recursos geotérmicos en el Perú

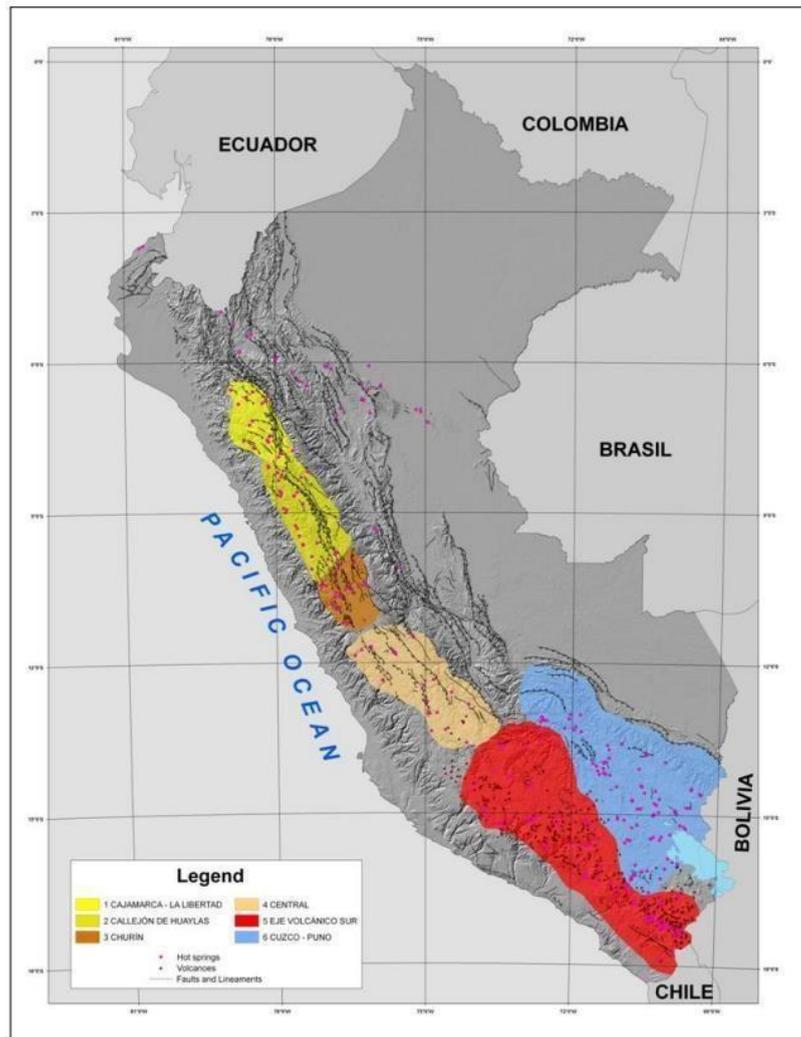
Conforme a INGEMMET, 2019, los recursos geotérmicos de Perú tienen un gran potencial para producir energía limpia, lo que ayudaría a la nación a hacer la transición a una economía verde. Los recursos geotérmicos de Perú se encuentran en zonas geotérmicas, que se clasifican como regiones geotérmicas, y se extienden por todo el territorio del país de norte a sur. El potencial geotérmico estimado de Perú es de 2860 MWe.

La V Región, también conocida como Eje Volcánico Sur, es la región geotérmica más prometedora del país. Está situada en la parte sur de Perú y abarca un área aproximada de 104.498 km², incluyendo porciones de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, así como partes de Apurímac, Ayacucho y Cusco. Este inventario incluye más de 300 manifestaciones geotérmicas, como fumarolas, fuentes termales y géiseres.

La Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes, que forma parte del Cinturón Volcánico de los Andes, contiene más de 300 centros volcánicos, de los cuales destacan por su actividad reciente los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Sabancaya, Huaynaputina, Tutupaca y Yucamane. El Eje Volcánico Sur está conformado por estos centros volcánicos. Las aguas termales, fumarolas y géiseres presentes en esta zona están vinculados al control estructural regional NW-SE y NE-SW de todos estos volcanes.

Figura 2.

Mapa Geotérmico del Perú



Nota. Información obtenida de INGEMMET, 2019

2.6. Uso de los recursos geotérmicos del Perú

INGEMMET, 2019, sostiene que en el Perú, dado que el calor geotérmico era importante para nuestros predecesores como ingrediente purificador y ceremonial, existen indicios tempranos de su uso durante las épocas preincaica e incaica. Basándose en crónicas españolas, la historia del uso de la energía geotérmica en Perú afirma que el Inca Atahualpa, junto con destacados funcionarios y autoridades del Tahuantinsuyo, empleaba la energía geotérmica para el descanso y la recreación.

La historia también cuenta que en 1532, mientras se bañaba en las transparentes aguas de los "Baños de Pultumarca" (lugar caliente), que emanaban cerca de la ciudad de Cajamarca, en la sierra norte de Perú, el inca Atahualpa, hijo del sol y monarca del Tahuantinsuyo, se enteró de la llegada de Francisco Pizarro.

La energía geotérmica es utilizada actualmente por los pueblos y poblaciones altoandinos con fines recreativos, como la balneoterapia, y por sus propiedades medicinales. La zona nacional alberga varios ejemplos de energía geotérmica en forma de volcanes, fumarolas, pozos de lodo, fuentes termales y géiseres. Debido a su ubicación privilegiada para el turismo, los recursos geotérmicos se han convertido en importantes motores del progreso social, cultural y económico.

Los principales usos de los recursos geotérmicos han sido el termalismo y la recreación en localidades como Baños del Inca en Cajamarca, Callejón de Huaylas en Huaraz, Churín en Lima, Calera en Arequipa y Aguas Calientes en Tacna, entre muchos otros. En nuestro país, las actividades relacionadas con el termalismo (hoteles, balnearios y recreación) han crecido, pasando de lugares primitivos a instalaciones contemporáneas.

En resumen, los recursos geotérmicos se utilizan directamente para el termalismo y el ocio, lo cual es bien conocido. Otras aplicaciones, como la calefacción doméstica, la salud (balneoterapia), la agricultura y la alimentación (piscicultura, invernaderos, secado de productos agrícolas y otros usos), la industria (teñido de lana, destilación de agua dulce y otros usos) y la generación de electricidad, se encuentran aún en las primeras fases de desarrollo.

Sin embargo, para utilizar la energía geotérmica de forma práctica deben darse una serie de condiciones, como elementos tecnológicos, sociales, política, económica y geológica (o físicos) que pueden permitir o no la explotación de la energía en un lugar concreto.

2.7. La energía geotérmica en el mundo

De acuerdo a (Prada & Noriega, 2022), se calcula que el calor atrapado en la superficie terrestre a 10.000 metros es 50.000 veces superior al de los recursos de petróleo y gas de todo el mundo, por lo que la energía geotérmica tiene un enorme potencial de expansión. Además la competitividad de la energía geotérmica ha aumentado con la expansión de las energías renovables, pero como los recursos geotérmicos no pueden ser utilizados por el ser humano en su estado natural, deben transformarse en otra forma de energía antes de que éste pueda utilizarlos directamente.

Al llegar a la superficie, el fluido térmico sufre una serie de cambios necesarios para aprovechar su energía útil. El nivel térmico del recurso determina el tipo de energía que se transforma a partir de él. Una parte considerable de la demanda de electricidad de países como Islandia, El Salvador, Nueva Zelanda, Kenia y Filipinas se cubre con esta

fuentes de energía renovable. Más del 90% de las necesidades de calefacción de Islandia se cubren con energía geotérmica.

La energía geotérmica de baja temperatura se utiliza directamente en 78 países de todo el mundo para aire acondicionado, calefacción, invernaderos, acuicultura y agricultura, casi siempre en ese orden. Las piscinas y los baños termales ocupan el último lugar en la lista de aplicaciones recreativas en todo el mundo.

Si se tienen en cuenta los usos directos, el ahorro energético anual de los 78 países equivale a 38 millones de toneladas de petróleo. En la actualidad, se utilizan centrales de vapor seco o flash para generar electricidad. Por otro lado, los yacimientos de temperatura media se utilizan con más frecuencia gracias a los avances de la tecnología de ciclo binario, que utiliza un intercambiador de calor para calentar un fluido en un circuito cerrado con fluido geotérmico. La cantidad de electricidad producida por energía geotérmica ha ido en aumento; en 2019, se produjeron 92 millones de GWh en el mundo.

Tabla 1

Capacidad instalada de energía geotérmica en el mundo

País	Capacidad instalada (2011)	Capacidad instalada (2021)	Datos importantes
Estados Unidos	2 409 MW	3 889 MW	Estados Unidos es el mayor productor de energía generada geotérmicamente. Cuenta con uno de los mayores complejos de generación de energía del mundo, "THE GEYSERS", que consta de 22 centrales de generación geotérmica con 350 pozos activos en California.
Indonesia	1 226 MW	2 277 MW	Cuatro de los diez proyectos más importantes del mundo se encuentran en Indonesia, incluidas las dos mayores centrales activas, Gunung Salak (1994), que tiene una capacidad de producción de 375 MW. Sarulla 1 (2017), que produce más de 330 MW.

Filipinas	1 846 MW	1 928 MW	Con una capacidad instalada de 458 MW y 289 MW, respectivamente, los complejos de Makban y Tiwi son dos de las principales centrales geotérmicas situadas allí.
Turquía	114 MW	1 676 MW	Con una capacidad establecida de 162,3 MW, Efeler, la mayor central geotérmica del país, está siendo ampliada para alcanzar los 259,9 MW; se prevé que este desarrollo cueste 350 millones de dólares. Efeler está situada en Aydin (Turquía). Este proyecto aumentaría la capacidad de generación hasta aproximadamente 810 GWh en 2022.
Nueva Zelanda	969 MW	1273 MW	Según la Asociación Geotérmica Neozelandesa, el porcentaje de electricidad producida en Nueva Zelanda que procede de la energía geotérmica es de aproximadamente el 13% del suministro total. Esto representa una contribución significativa a la capacidad total de generación de energía de la nación, ya que otros países con mayor capacidad instalada tienen cifras de capacidad de generación inferiores.

Nota. Información obtenida de Prada & Noriega, 2022

2.8. Costos de la energía geotérmica

(Prada & Noriega, 2022), el coste de generar electricidad a partir de energías renovables ha disminuido en los últimos diez años como consecuencia de los avances tecnológicos, las economías de escala, unas cadenas de suministro más competitivas y la creciente experiencia de los promotores de proyectos.

Además, al reducir la ambigüedad sobre los mejores lugares para iniciar la investigación, la identificación de los recursos geotérmicos existentes también ayuda a que la energía geotérmica sea más competitiva. El coste de las energías renovables ha disminuido considerablemente, según las estadísticas de 17 000 proyectos recopiladas por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) en 2019.

La pandemia de COVID 19 provocó una catástrofe energética mundial en 2020, pero el ritmo de crecimiento de la competitividad de las energías renovables se ha mantenido constante. Aunque la energía geotérmica es cada vez más competitiva, las previsiones para las energías renovables han sido positivas. De 2010 a 2020, el coste nivelado de la energía (LCOE) oscila entre 0,04 y 0,17 USD/kWh, con una media ponderada de 0,07 USD/kWh.

Los valores del coste nivelado de la electricidad (LCOE) para una central geotérmica se calculan suponiendo una vida económica de 25 años y unos costes de mantenimiento de 110 dólares por kW anuales. Los valores oscilan entre 0,04 y 0,14 dólares por kWh. Los analistas prevén que los costes de la geotermia bajen hasta 2050, lo que aumentará la aplicación de la tecnología en proyectos y promoverá su expansión.

Aunque requieren una gran cantidad de capital, los proyectos geotérmicos tienen unos costes operativos extremadamente bajos y predecibles. La exploración y evaluación de recursos, incluida la exploración del emplazamiento, la perforación de sondeos y la perforación de pozos de inyección, suponen la mayor parte de los costes de una central geotérmica. Otros factores que pueden afectar a los costes son la tecnología que utilizará la central (flash o binaria), la productividad de los pozos (número de pozos) y otras características del campo geotérmico.

Aunque las centrales geotérmicas dependen en gran medida del emplazamiento, sus costes unitarios oscilan entre 1870 USD/kW y 5050 USD/kW en función de su tecnología.

Los costos totales instalados de una central geotérmica dependen de los siguientes factores:

- El precio de la evaluación y exploración de recursos
- Costos de perforación de pozos de producción y reinyección.
- Costes derivados de las infraestructuras, el sistema de recogida y eliminación de fluidos geotérmicos y los servicios públicos de superficie
- Gastos asociados al transporte y la suficiencia de la energía eléctrica producida

La decisión de emplear una central binaria o flash depende de la fuente de energía, la productividad del pozo y las características del yacimiento. Los costes globales instalados de un proyecto de generación de energía geotérmica convencional de condensación de tipo flash aumentaron entre 1.900 y 3.800 USD /kW en 2009, mientras que en el caso de las centrales binarias también aumentaron su coste entre 2.250 y 5.500 USD /kW. La temperatura del yacimiento también afecta a los gastos porque permite medir la productividad del pozo antes de perforarlo.

2.9. Estructura de un sistema geotérmico convencional

La convección del agua en la corteza superior de la Tierra, que traslada el calor de una fuente de calor a la superficie dentro de un área determinada, es una representación esquemática de los sistemas geotérmicos. El yacimiento, la zona de recarga, la fuente de calor y los canales de conexión a través de los cuales el agua superficial entra en el yacimiento y, en su mayor parte, sale de nuevo a la superficie, son los elementos fundamentales de un sistema hidrotermal. La concentración de calor se ve favorecida por la presencia de un sello, creado por estructuras o rasgos geológicos que actúan como cubierta impermeable.

Los recursos geotérmicos suelen limitarse a zonas de la corteza donde un flujo de calor más intenso calienta el agua en rocas permeables profundas, o yacimientos, que en puntos cercanos. Cerca de los bordes de las placas, donde son frecuentes fenómenos geotérmicos como fumarolas, fuentes termales, géiseres, etc., son los lugares más prometedores para encontrar recursos. Los volcanes activos también son una forma de actividad geotérmica, aunque difieren en ciertos aspectos. Hay sistemas geotérmicos en lugares donde la actividad volcánica reciente no los ha afectado que presentan un flujo de calor elevado o normal.

La circulación profunda de fluidos a través de fallas o estratos plegados, el adelgazamiento de la corteza o el calor residual de rocas volcánicas alojadas en la corteza son algunas de las causas de los campos geotérmicos. (Secretaría de gobierno de energía, 2019)

2.10. Clasificación de sistemas geotérmicos

Conforme a (Valencia, 2021), menciona lo siguiente:

En estos momentos, son los únicos sistemas que se pueden adquirir y que pueden producir electricidad. En pocas palabras, este tipo de sistema debe cumplir tres condiciones geológicas esenciales:

- Una cámara magmática de 700-1000°C situada a 5-10 km por debajo de la superficie suele ser la fuente de calor.
- Acuífero: tipo de roca porosa que puede contener las fases líquida y vapor de los fluidos geotérmicos.
- El material rocoso impermeable que constituye la capa de sellado descansa sobre el acuífero y mantiene el agua atrapada y la presión del acuífero.

También se pueden separar las temperaturas y los métodos de utilización de los recursos geotérmicos.

Tabla 2.
Clasificación de reservorios geotérmicos hidrotermales

Temperatura	Entalpia	Estado físico
Baja temperatura: Sistemas que contienen aguas termales con una temperatura de depósito inferior a 150°C a una profundidad de un kilómetro.	Baja entalpia: Sistemas geotérmicos con entalpías de depósito inferiores a 800 kJ/kg y temperaturas de funcionamiento inferiores a 190 °C.	Líquido dominante: Yacimientos geotérmicos que, en determinadas situaciones de presión del yacimiento, tienen agua por debajo del punto de ebullición. Puede haber vapor.
Temperatura media		Mixtos: Yacimientos geotérmicos que contienen agua y vapor
Temperatura alta: Sistemas con una temperatura en el depósito mayor a 200 °C.	Alta entalpia: Sistemas geotérmicos con entalpías en el yacimiento mayores a 800 kJ/kg	Vapor dominante: Un yacimiento geotérmico con una temperatura mayor a la de ebullición.

Nota. Información obtenida de Valencia, 2021

2.10.1. Sistemas geotérmicos mejorados

Los sistemas hidrotermales ofrecen un potencial geotérmico menor que los sistemas geotérmicos mejorados o los de roca seca caliente, y aún no son comercialmente viables. Este recurso geotérmico puede alcanzarse a profundidades de entre tres y diez kilómetros y temperaturas superiores a 200 °C.

La retención de calor de la roca caliente y su escasa o nula permeabilidad (presencia de fluidos) hacen que estos sistemas resulten fascinantes. Para utilizar sistemas geotérmicos mejorados es necesario recurrir a la fracturación hidráulica para fracturar artificialmente la roca caliente y seca. Tras calentarse a una temperatura superior e inyectarse a través de un pozo inyector, el agua se extrae a través de un pozo productor y se utiliza para generar electricidad.

Para explorar su posible aplicación futura, se están llevando a cabo programas piloto en Australia, Francia, Suiza, Inglaterra, Japón y Estados Unidos. Las estimaciones de viabilidad del MIT sugieren que para 2050 podrían instalarse más de 100.000 MW en todo el mundo.

2.10.2. Sistemas geotérmicos marinos

En el fondo marino, los respiraderos hidrotermales y las chimeneas proporcionan recursos geotérmicos de alta entalpía (> 300 °C). Pueden distinguirse dos tipos de sistemas geotérmicos sumergidos: los sistemas poco profundos, que se encuentran cerca de la costa y suelen encontrarse a profundidades de entre 1 y 50 metros, y los sistemas profundos, que se encuentran a lo largo de las dorsales oceánicas medias y suelen encontrarse a profundidades de entre 1.000 y 4.000 metros bajo el nivel del mar. Este tipo de sistema, con flujos de calor de hasta 12 W/m², se ha descubierto y estudiado con gran detalle en el Golfo de California.

2.10.3. Sistemas geotérmicos supercríticos

Su principal característica es la existencia de fluidos geotérmicos supercríticos, que pueden alcanzar temperaturas de hasta 600 °C y se encuentran en estos sistemas conectados a profundidades considerables. Este fluido puede proporcionar hasta diez veces más energía que un sistema geotérmico hidrotermal (yacimientos convencionales).

2.10.4. Sistemas geotérmicos magmáticos

Estructuras volcánicas activas, zonas de debilidad cortical, bordes de placas e intrusiones ígneas con temperaturas lo suficientemente altas como para fundirlas parcialmente son

algunas de sus relaciones geológicas. Sus temperaturas, que oscilan entre 600 y 1400°C, los definen. En la actualidad no existen suficientes materiales aptos para soportar altas temperaturas y la corrosión, por lo que este tipo de sistemas no se utilizan.

2.10.5. Sistemas de agua caliente asociado con yacimientos de petróleo y gas

Los pozos profundos de gas o petróleo producen calor, que se encuentra en el agua. De momento, estos recursos no se utilizan y se desconoce su potencial calorífico.

2.10.6. Sistemas geotérmicos conductivos sedimentarios

Están situadas en cuencas sedimentarias formadas por capas de sedimentos de muchos kilómetros de espesor. Las fuentes de calor radiogénico son responsables del gradiente geotérmico superior a la media (>30 °C/km) de estas cuencas. Estos sistemas son conductores por naturaleza. Las aplicaciones directas de la energía geotérmica son más rentables, pero el gradiente no es lo bastante elevado como para generar suficiente electricidad.

2.10.7. Sistemas geotérmicos geopresurizados

Lo que las hace únicas son sus temperaturas superiores a 150 °C, su exposición a altas presiones (700 bares), su emplazamiento a profundidades considerables (6.000 m) y la presencia de fluido geotérmico saturado de metano. Normalmente, los yacimientos de rocas sedimentarias los albergan. Este tipo de sistema produce energía térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (flujos de fluido a alta presión). Su potencial es aún desconocido y de momento no se utiliza en México.

2.11. Etapas en la exploración de un reservorio

(Servicio geológico colombiano, 2019), estipula que están conformados por,

2.11.1. Compilación de información y trabajo de escritorio

Se trata de recopilar investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas realizadas con anterioridad para identificar previamente la zona de estudio. Estos trabajos incluyen informes y mapas, así como datos de las Corporaciones Autónomas relativos al inventario de fuentes termales.

Actualmente, se realizan las primeras observaciones para planificar los trabajos geológicos y la adquisición de geofísica, así como para detectar estructuras mediante imágenes de satélite y fotografías aéreas. También se recogen aquí las aclaraciones sobre la interpretación y realización del documento final.

2.11.2. Trabajo de campo

La geología consiste en determinar los componentes necesarios para crear un mapa de la región observando, caracterizando y tomando muestras de las rocas, así como midiendo las fracturas y otras características topográficas. Este trabajo se realiza utilizando herramientas estándar como un martillo, una brújula y una lupa, entre otras.

En geoquímica, se toman muestras directamente de manifestaciones superficiales como fumarolas y fuentes termales. Esto permite realizar lecturas rápidas de la temperatura con un termómetro, así como mediciones del pH (nivel de acidez) y la conductividad eléctrica (capacidad para conducir la temperatura) con equipos multiparamétricos. En la investigación geofísica, el trabajo de campo incluye la medición en lugares predeterminados y, según la técnica, la extensión de equipos en la superficie para obtener lecturas del subsuelo durante horas o días.

2.11.3. Análisis de laboratorio

Las muestras de roca, agua y/o gas se envían a los laboratorios para realizar diversos estudios químicos y determinar la composición, edad, presencia de minerales, porosidad y muchas otras características. Este paso no es necesario para la investigación geofísica, aunque los programas informáticos procesan los datos con gran detalle.

2.11.4. Interpretación de los datos

Los resultados de la adquisición geofísica, el análisis geoquímico y el análisis geológico se muestran en diagramas para crear relaciones entre diversas especies químicas o tipos de rocas. En geofísica, a las rocas o estructuras (fallas) se les asignan cualidades físicas que se distinguen por diferentes colores.

2.11.5. Resultados

En geología, podemos recibir informes técnicos que corroboren los hechos, así como un mapa geológico que ilustre los numerosos tipos de roca presentes en la superficie. Al determinar la composición química del gas y/o del agua, la geoquímica nos permite determinar los tipos de fluidos que circulan y sus características.

Los mapas de anomalías, o variaciones de las características físicas, se elaboran en geofísica y muestran características del subsuelo, como la densidad (el peso de un determinado volumen de roca), el magnetismo y la resistividad eléctrica (la resistencia al flujo de corriente).

2.12. Tipos de centrales geotérmicas

De acuerdo a (Reguero, 2019), están las:

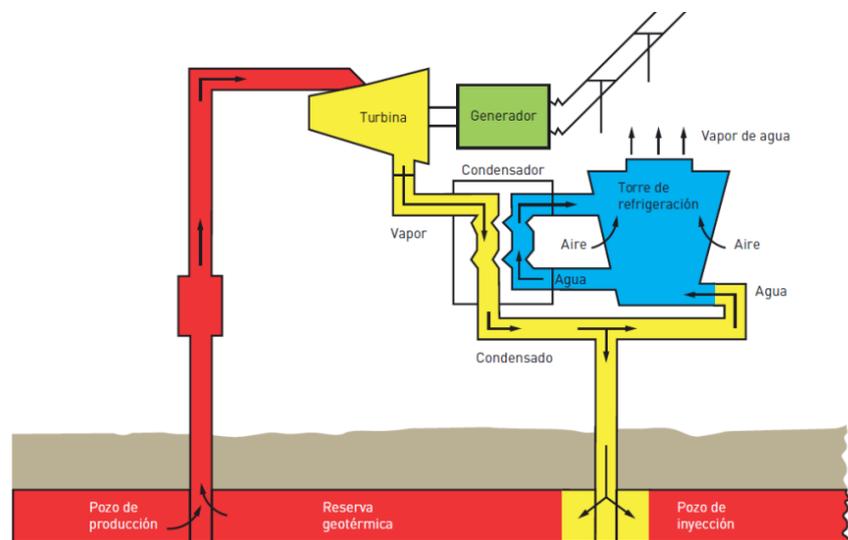
2.12.1. Plantas de vapor seco

En las centrales de vapor seco, el vapor seco se extrae de un depósito y se hace pasar por una turbina de vapor para producir energía directamente. Con la excepción de producir vapor directamente en lugar de evaporar agua utilizando el calor de la combustión de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural, o del calor producido por las reacciones de fisión del uranio en las centrales nucleares, el proceso es muy similar al de cualquier otra central que genere electricidad.

A continuación, se muestra un esquema de una central geotérmica de vapor seco. El requisito de eliminar las partículas grandes o disueltas que podrían amenazar la turbina es el principal problema de un sistema tan básico. Por ello, las centrales geotérmicas tienen los costes de producción más bajos; la primera de este tipo que se puso en servicio fue una central de 250 kW situada en Lardarello (Italia) a principios del siglo XX.

Figura 3.

Central geotérmica de vapor seco



Nota. Información obtenida de Reguero, 2019

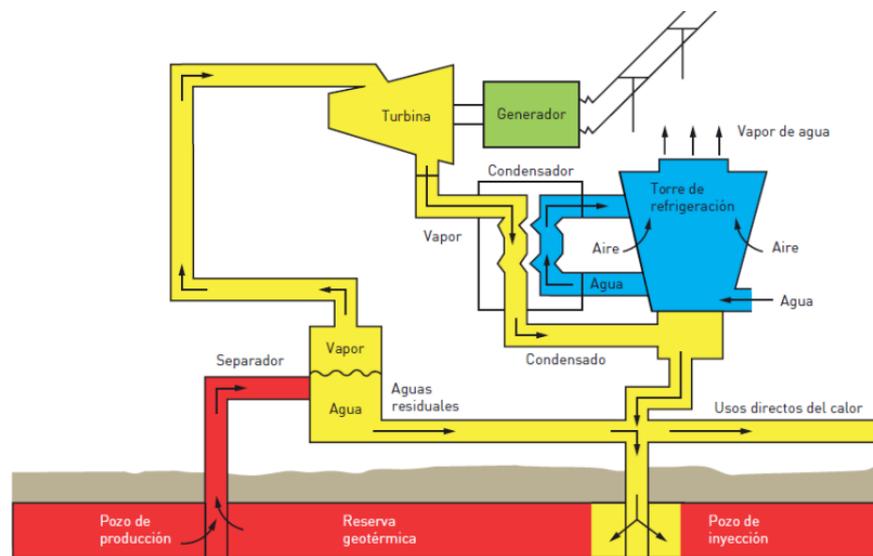
2.12.2. Plantas flash

Cuando el fluido geotérmico es una mezcla de líquido y vapor, se aplica la técnica flash. El vapor se extrae a través de la tubería y luego pasa por un separador de vapor-líquido para que pueda utilizarse directamente en una turbina para producir electricidad. Para este

tipo de instalación, la temperatura del fluido geotérmico debe situarse entre 190°C y 250°C. Como hay que tratar el vapor antes de utilizarlo en la turbina, este tipo de instalación es más caro que las de vapor seco. Como el ciclo exige un vapor muy purificado, utiliza el recurso geotérmico de forma más eficaz y, en general, ofrece mejores resultados, a pesar de su mayor coste. Este tipo de sistema sirve de base para la producción de electricidad a partir de energía geotérmica. Los orígenes de este tipo de planta se sitúan en Wairakei (Nueva Zelanda).

Figura 4.

Central geotérmica tipo flash



Nota. Información obtenida de Reguero, 2019

2.12.3. Plantas binarias

Los depósitos de fluido geotérmico de las centrales binarias tienen temperaturas inferiores a 150°C. El proceso consiste en utilizar el fluido geotérmico para calentar otro fluido, el que completa el ciclo. La principal ventaja es que no se necesita una temperatura elevada para terminar el ciclo porque el fluido utilizado para ello tiene un punto de ebullición bajo.

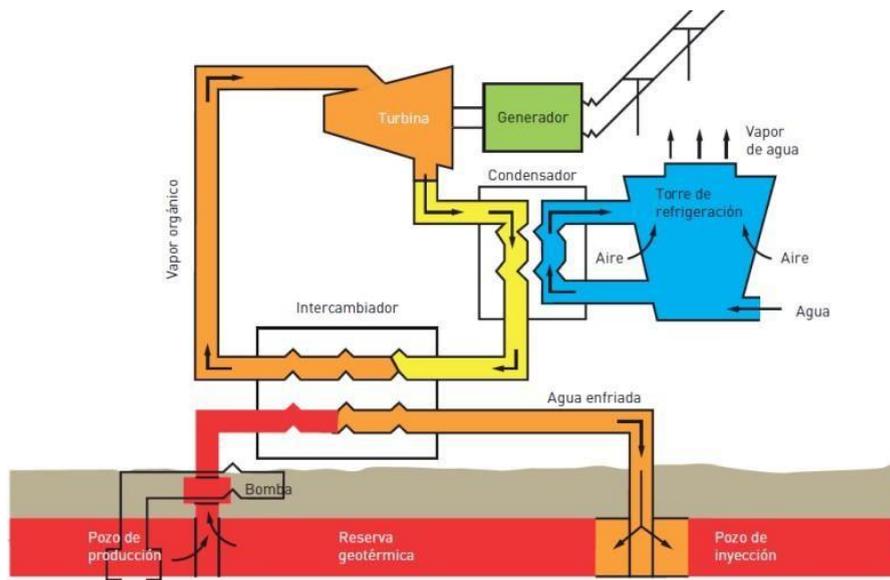
Dicho de otro modo, el fluido geotérmico nunca entra en contacto con la turbina, sino que sólo transfiere el calor necesario para el funcionamiento de la central. El hecho de que el fluido geotérmico nunca entre en contacto con la atmósfera reduce el impacto ambiental, lo que resulta ventajoso también en el caso de yacimientos extremadamente tóxicos o salinizados.

Actualmente existen dos posibles ciclos:

- El **ciclo rankine orgánico**, en la que un hidrocarburo o una combinación de hidrocarburos suele ser el fluido que hace funcionar el ciclo. La elección que se haga dependerá sobre todo de la temperatura a la que se encuentre el fluido geotérmico.
- El **ciclo Kalina** emplea un fluido de trabajo compuesto por una mezcla de agua y amoníaco que se calienta en el evaporador y se añade a un separador de vapor y líquido. Debido a la diferencia entre las dos temperaturas de ebullición, el intercambiador de calor genera vapor que tiene una alta concentración de amoníaco, pero un bajo contenido de agua. Para minimizar la necesidad del condensador, la parte líquida se traslada posteriormente a un precalentador. La capacidad de este ciclo para alterar la composición del fluido en función de las necesidades del fluido geotérmico es una de sus ventajas. El mayor rendimiento obtenido compensa el mayor gasto que supone la implantación de este ciclo.

Figura 5.

Central geotérmica binaria



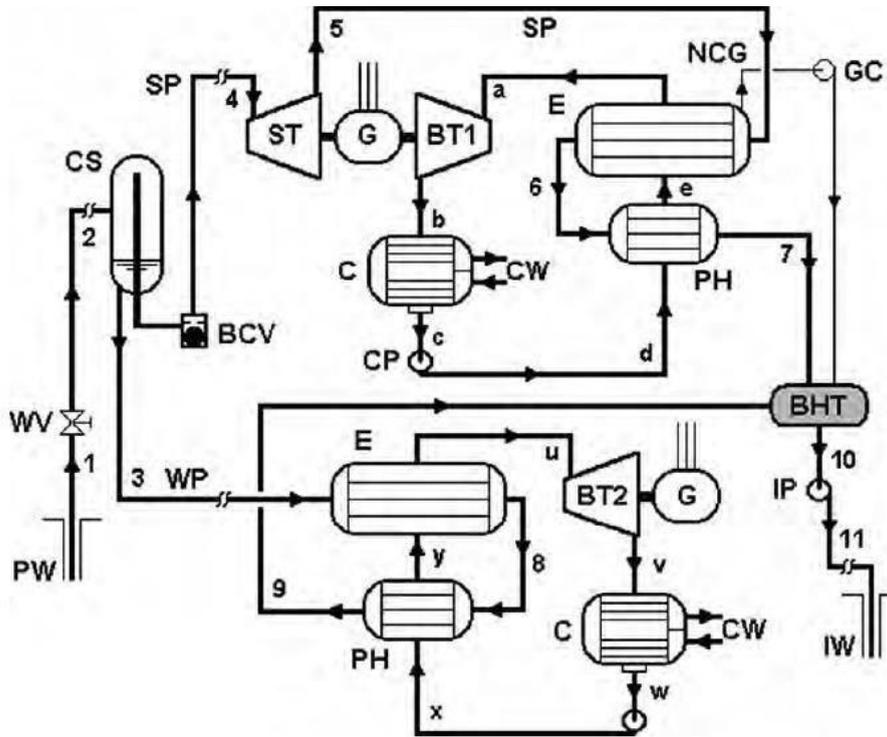
Nota. Información obtenida de Reguero, 2019

Debido a la enorme dificultad de encontrar yacimientos lo suficientemente calientes como para que el fluido extraído consista únicamente en vapor seco, la mayoría de las centrales que funcionan actualmente son plantas binarias y flash.

Aunque solo aportan el 10,4 % de la energía total generada, las centrales binarias constituyen alrededor del 35 % de todas las centrales en funcionamiento cuando se trata de la producción mundial de electricidad a partir de energía geotérmica. Con 1.245 MW

Figura 7.

Central geotérmica single flash binario integrado



Nota. Información obtenida de Medina & Guillen, 2018

2.13. Ciclo Rankine

(Mendez, 2015), afirma que es un modelo para estimar el rendimiento de las máquinas de vapor. Se compone de un ciclo termodinámico ideal que produce trabajo mecánico a partir de energía térmica.

Una fuente externa, a menudo representada por una caldera que emplea agua como fluido de trabajo, proporciona el aporte térmico del sistema. El ciclo explica cómo las máquinas térmicas que funcionan con vapor producen la energía necesaria en las centrales termoeléctricas.

2.13.1. Descripción del ciclo:

El Ciclo de Rankine está compuesto por cuatro procesos delimitados por los estados que atraviesa el fluido por el mismo:

Proceso 1-2: Expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. La potencia se produce en el eje de la turbina de vapor, donde se produce en una turbina de vapor.

Proceso 2-3: La transmisión de calor al circuito de refrigeración a presión constante hace que el fluido de trabajo se sature de líquido. Ocurre en un intercambiador de calor llamado condensador, preferiblemente sin pérdida de presión.

Proceso 3-4: utilizando una bomba para comprimir isoentrópicamente el fluido de trabajo en la fase líquida, lo que requiere energía. La presión del fluido de trabajo se eleva hasta el nivel de presión de la caldera.

Proceso 4-1: Transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera.

La potencia neta real del ciclo se calcula deduciendo la potencia utilizada por la bomba, que suele ser insignificante en contraste y se pasa por alto.

Los procesos en la bomba y la turbina no serían isentrópicos, y se producirían pérdidas de carga en el condensador y la caldera en un ciclo más práctico que el ciclo Rankine perfecto mencionado anteriormente. Todo esto haría que la eficiencia térmica del ciclo disminuyera.

Tabla 3
Parámetros intervinientes

Q1	Potencia térmica aportada a la caldera
Q2	Potencia térmica cedida en el condensador
M	Caudal o flujo másico del fluido
Wt	Potencia mecánica entregada por la turbina
Wb	Potencia mecánica consumida en la bomba
nt	Rendimiento térmico
h1,h2,h3,h4	Entalpías específicas de los estados principales
s1,s2,s3,s4	Entropías específicas de los estados principales

Nota. Información obtenida de Mendez, 2015

2.13.2. Mejoras al ciclo

a. Recalentamiento

Consiste en transformar el vapor saturado en vapor sobrecalentado a la salida de la caldera, lo que aumenta la temperatura del vapor saturado. Esto aumenta la temperatura media del medio productor de calor y aumenta la eficacia térmica del ciclo. La calidad de los materiales utilizados en la caldera, que no deben calentarse por encima de 540 °C, es el elemento limitador del proceso.

b. Regeneración o sangrado

Otro método empleado es la extracción de vapor de la turbina en varios puntos conocidos como "purgas". Este vapor se utiliza para calentar el agua de alimentación en un mecanismo conocido como regenerador. Si se hubiera expandido más en la turbina, podría haber generado más trabajo. Para cada valor de la presión de extracción, se modifica la fracción de vapor suministrada al regenerador, de modo que el vapor sale de éste como líquido saturado. Al reducir la necesidad de aporte de calor durante el cambio de estado, el agua que entra en la caldera alcanza una temperatura próxima a la de vaporización, lo que aumenta el rendimiento total.

2.14. Ciclo Rankine orgánico

(Albuixech, 2017), dice que, el agua suele emplearse como fluido de trabajo en un ciclo Rankine, pero cuando surge la necesidad de aplicaciones a baja temperatura, deben considerarse nuevos fluidos de trabajo que puedan producir energía mecánica de forma eficaz a bajas temperaturas.

Los componentes y el funcionamiento de un ciclo Rankine orgánico son idénticos a los de un ciclo Rankine convencional; sin embargo, el fluido de trabajo se elige de forma diferente, teniendo en cuenta el requisito de que tenga un impacto medioambiental mínimo, además de ciertas características tecnológicas.

Emplear fluidos orgánicos en los ciclos Rankine, otorga ciertos beneficios comparándolo con el uso de agua. Estas ventajas, entre otras, son

- Disminución de la temperatura y la presión crítica: esto le permite recuperar calor a una temperatura inferior a la de un ciclo típico y elimina la necesidad de temperaturas tan elevadas en la entrada del condensador, ya que allí será más difícil que se forme condensación.
- El sistema puede simplificarse evitando la necesidad de desaireadores o dispositivos de extracción de incondensables del condensador cuando la presión de condensación es superior a la temperatura atmosférica. De este modo se evita la entrada de aire en el circuito. El agua suele tener una presión de condensación absoluta inferior a 100 mbar.
- Menor presión de evaporación que en los ciclos Rankine de vapor: esto abarata los costes de instalación al reducir la complejidad. Mientras que el de vapor suele funcionar a más de 60 bares, el CRO suele funcionar a poco más de 30 bares.

- La pendiente nula o positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s: Algunos fluidos orgánicos presentan una línea de vapor saturado nula o positiva, lo que permite realizar la entrada de la turbina en vapor saturado sin correr el peligro de condensación a la salida de la turbina. Esto prolonga la vida útil de los álabes de la turbina al disminuir el riesgo de desgaste. En consecuencia, el recalentamiento sería considerablemente menor que si se utilizara agua como fluido de trabajo. Cabe mencionar que el recalentamiento aumenta la eficiencia en los CRO con regeneradores.
- Todo esto es lo que permite que este tipo de ciclos sean capaces de aprovechar los calores residuales de menor temperatura.

Pero también existen algunos inconvenientes:

- Dado que los fluidos orgánicos tienen un calor latente significativamente inferior al del agua, requieren un caudal másico mucho mayor en el evaporador para captar la misma potencia térmica. En consecuencia, al trabajar con fluidos orgánicos, la bomba consumirá más energía.
- El agua es mucho más fácil de trabajar porque no es tóxica, no es inflamable y es extremadamente estable. Además, es mucho más barata y fácil de conseguir.
- El uso de agua es mucho más eficiente hasta una determinada temperatura. Por este motivo, para la recuperación de calor a alta temperatura se emplean los típicos ciclos Rankine.

2.14.1. Fluidos de trabajo para un ciclo Rankine orgánico

(Chafloque & Incio , 2022), la eficiencia de un ciclo Rankine Orgánico (CRO) depende de dos factores principales: las condiciones de trabajo del ciclo y las propiedades termodinámicas del fluido.

a. Selección de un fluido de trabajo

Al seleccionar el fluido de trabajo de un ciclo CRO, se deben seguir ciertos criterios para tomar una decisión correcta, principalmente ligados a las propiedades termofísicas y requisitos de seguridad

- Para reducir la irreversibilidad creada durante la transferencia de calor a una diferencia de temperatura finita en el ciclo, la temperatura crítica del fluido de trabajo debe ser superior a la temperatura operativa más alta del ciclo.

- Para evitar la entrada de aire en el sistema, la presión de condensación del fluido de trabajo debe ser superior a la presión ambiente.
- La variación de entalpía de la turbina debe ser suficientemente elevada para limitar el caudal másico del fluido de trabajo y aumentar la eficacia termodinámica del ciclo.
- Para que la turbina cumpla los requisitos de dimensiones reducidas y compense el menor salto entálpico del turbo expansor, la densidad del fluido de trabajo en la entrada de la turbina debe ser elevada.
- Dado que en los intercambiadores de calor del ciclo se producen intercambios de calor convectivos, el parámetro del coeficiente de transferencia de calor convectivo debe ser elevado; el coeficiente aumenta a medida que disminuye la viscosidad del fluido y aumenta la conductividad térmica.
- Para que los fluidos de trabajo minimicen las caídas de presión y aumenten la transferencia de calor por convección, su viscosidad tanto en estado líquido como vapor debe ser baja.
- Compatibilidad de los materiales y estabilidad de los límites del fluido: los fluidos orgánicos tienen que ser no corrosivos para la mayoría de los materiales utilizados en los distintos componentes del ciclo CRO, incluidos las turbinas y las tuberías. Además, el fluido orgánico debe mantener su estabilidad química y térmica a todas las presiones y temperaturas del ciclo.
- El fluido no debe ser tóxico y, en el mejor de los casos, debe ser combustible para cumplir los requisitos de seguridad.

b. Lista de posibles fluidos de trabajo para un CRO

Ningún fluido corporal conocido satisface actualmente todos los requisitos mencionados. Los fluidos pueden dividirse en tres grupos basándose únicamente en sus características termofísicas; estos grupos vienen determinados por la derivada de la curva de saturación de vapor del fluido en el diagrama TS. La propiedad más significativa del fluido en el CRO es la curva de saturación de vapor, ya que tiene un impacto directo en la eficiencia y el diseño de los componentes del ciclo.

Dado que la derivada dT/dx depende del calor específico del vapor, tiene una relación directa con la estructura molecular del fluido. Cuanto mayor es la complejidad molecular del fluido, mayor es su derivada. Las moléculas de escasa complejidad tienen esta derivada negativa, lo que designa al fluido como húmedo; las moléculas más complejas

con escasa capacidad calorífica tienen esta derivada positiva, lo que designa al fluido como seco.

- El fluido seco, tiene la derivada de T con respecto a S positiva. El fluido seco se expande isentrópicamente, sobrecalentando su vapor saturado. Debido a que no hay posibilidad de sobrecalentamiento y la posterior erosión de las palas, lo que resulta en la ausencia de fluido en estado líquido, este tipo de fluido es apropiado para la turbina.
- Fluido húmedo: consiste en $d T / d s$ de bajo peso molecular y derivada negativa (como el agua y el amoníaco); la expansión tiene lugar en la región donde coexisten las dos fases del fluido.
- Un líquido isentrópico es un fluido cuya expansión es isentrópica, resultando cero la curva vertical que representa la derivada de la temperatura con respecto a la entropía.

2.15. Marco legal de energía geotérmica

(Medina & Guillen , 2018), define que el mercado eléctrico peruano está conformado por las siguientes leyes

- DL N 28544 Ley de Concesiones Eléctricas
- DS N 009-93 Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas
- Ley N 26734 Ley de Creación del OSINERG
- Ley N 26876 Ley antimonopolio
- DS N 020-97 EM, norma técnica de la calidad de los servicios de electricidad

Las leyes pertenecientes a los recursos geotérmicos son,

- La ley Orgánica de los recursos geotérmicos
- El reglamento de la Ley Orgánica de los recursos geotérmicos

2.15.1. Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos

La norma para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos del suelo y subsuelo del territorio nacional se menciona en la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, aprobada el 29 de febrero de 1997. El marco legislativo propicio para la inversión privada. Se destaca que alrededor de 300 sectores de aguas termales de nuestra nación, cuya temperatura oscila entre 49 °C y 89 °C, se encuentran a lo largo de la Cordillera Occidental y, en menor medida, en la zona oriental y en las tierras bajas interandinas.

Con la ayuda de esta ley, el Estado fomenta el desarrollo prudente de los recursos geotérmicos con el objetivo de garantizar el suministro energético necesario para el crecimiento económico nacional, el bienestar de la población y la diversificación efectiva de las fuentes de energía. También fomenta la prudencia en el desarrollo de las actividades, el acceso y la competencia sin restricciones, todo ello en cumplimiento de la ley.

El Estado está representado por el Ministerio de Energía y Minas, que se encarga de crear, proponer y ejecutar la política del subsector, además de dictar otras normas pertinentes. Corresponde al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERG) velar por el cumplimiento de esta ley.

Los derechos geotérmicos permiten el uso de los recursos, sujeto a procedimientos de autorización y concesión. La disposición de estos derechos impone obligaciones al usuario, principalmente relacionadas con el cumplimiento de calendarios de trabajo y compromisos de inversión. Las concesiones de recursos geotérmicos son propiedades que otorgan a sus titulares derechos que se rigen por esta legislación.

En esta ley se considera el reconocimiento de la actividad geotérmica, la exploración y la explotación de recursos geotérmicos.

2.15.2. Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos

El Decreto Supremo 072-2006-EM, que entró en vigencia el 24 de diciembre de 2006, regula el régimen tributario a implementarse en el ámbito de las garantías para el fomento de la inversión y es utilizado por el Ministerio de Energía y Minas para gestionar el mencionado acto.

Ocho títulos componen la norma; incluyen la actividad geotérmica, los derechos y responsabilidades de los titulares, el agotamiento de la energía geotérmica, la jurisdicción administrativa, los procedimientos, la protección del medio ambiente y las garantías de promoción de las inversiones.

2.15.3. Normativa internacional de recursos geotérmicos

Las leyes que se han elaborado se refieren a los siguientes temas, aunque varían en función de la nación que desee utilizar el recurso geotérmico y establecen normas diferentes basadas en sus propios criterios:

- Procedimientos para adquirir concesiones de explotación, investigación y permisos de exploración.
- Procedimientos para la aprobación de líneas e instalaciones de producción
- Procedimientos para ser reconocido como instalación bajo un régimen específico
- Procedimientos de evaluación de impacto ambiental.

2.16. Energía geotérmica, contaminación y corrosión

El impacto medioambiental de la energía geotérmica es menor que el de las centrales térmicas nucleares y los combustibles fósiles, y es incluso menor que el de otras fuentes de energía renovables. Utiliza menos espacio terrestre y genera muy pocos residuos y gases en comparación con otras fuentes de energía térmica.

Como las instalaciones de energía geotérmica no requieren la combustión de combustibles, no contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.16.1. Contaminación

Los datos recogidos en 85 centrales geotérmicas de 11 países, con una capacidad operativa de 6.648 MWe, muestran una emisión media ponderada de CO₂ de 122 g/kWh. Esto representa el 85% de la capacidad geotérmica en 2001. El mayor productor de electricidad del mundo, Estados Unidos, declaró 91 g/kWh en 2008.

En comparación con las instalaciones binarias refrigeradas por aire, que no necesitan agua dulce, las centrales geotérmicas suelen consumir menos agua por unidad de electricidad generada: unos 20 litros por megavatio hora. Cuando las aguas residuales de las torres de refrigeración se vierten a los ríos y lagos circundantes, suponen un riesgo de contaminación térmica, ya que su temperatura es superior a la del agua circundante.

2.16.2. Corrosión

Es necesario conocer la composición salina del recurso antes de diseñar la instalación geotérmica por distintas razones:

- El fluido del yacimiento geotérmico puede estar saturado de sales, lo que provoca la precipitación de éstas y la formación de incrustaciones cuando el yacimiento se enfría. Esto puede provocar problemas como el estrangulamiento gradual del pozo de extracción y el mal funcionamiento de bombas, válvulas, etc.
- Debe evitarse cualquier tipo de vertido en aguas superficiales si el fluido tiene una alta concentración de sales y/o sustancias químicas peligrosas.

El proceso de separación del vapor debe realizarse cuando el fluido geotérmico es de predominio líquido. Como consecuencia, la salmuera resultante es altamente corrosiva y contiene sílice (SiO₂), carbonato cálcico (CaCO₃), hierro (Fe), cloruros (Cl) y otros sólidos arrastrados desde el yacimiento debido a su alto contenido en sal y a su elevada temperatura. Uno de los mayores problemas que plantea el uso de recursos geotérmicos es el ensuciamiento. En los siguientes equipos es donde se forman con más frecuencia:

- Tuberías de inyección.
- Separador y Flasher.
- Incrustaciones debidas a la formación de gotas de agua desde el vapor en turbinas y líneas de vapor.

2.17. Propiedades de los fluidos ORC utilizados en una central geotérmica

La mayoría de refrigerantes usados en una central geotérmica son inflamables, por lo que siempre es recomendable que se instale un sistema contra incendios.

Las siglas por las cuales todo refrigerante es evaluado son la ODP y GWP, que significan respectivamente “poder de destrucción de la capa de ozono” y potencial de calentamiento global. De acuerdo a (Medina & Guillen, 2018), el valor normalizado para el ODP y GWP es igual a 1.

Figura 8.

Propiedades de seguridad de refrigerantes más comunes

Fluido	Fórmula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
R-12	CCl ₂ F ₂	No tóxico	No inflamable	1.0	4500
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	No tóxico	No inflamable	0.7	5850
Propano	C ₃ H ₈	Baja	Muy alta	0,000	3
i-Butano	i-C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0,000	3
n-Butano	C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0,000	3
i-Pentano	i-C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0,000	3
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
Amoníaco	NH ₃	Tóxico	Baja	0	3
Agua	H ₂ O	No tóxico	No inflamable	0	-

Nota. Información obtenida de Medina & Guillen, 2018

De acuerdo a (Martin et al., 2019), refrigerantes como el R-123, R-134a, R-245fa poseen las siguientes características:

Tabla 4
Propiedades de refrigerantes R-

Fluido	Formula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
R-123	$C_2HCl_3F_3$	Tóxico	No inflamable	0.02	77
R-134a	CF_3CH_2F	Baja	No inflamable	0.055	1430
R-245fa	$CF_3CH_2CHF_2$	Tóxico	No inflamable	0	1030

Nota. Información obtenida de Martin et al., (2019)

Conforme a (Carl Roth, 2024), la propiedad del N-hexano es:

Tabla 5.
Propiedades del refrigerante N-Hexano

Fluido	Formula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
N Hexano	C_6H_{14}	Tóxico	Inflamable	0	7

Nota. Información obtenida de Carl Roth, (2024)

(Merck, 2024) estipula que el refrigerante Hexametildisiloxano, posee las siguientes propiedades:

Tabla 6.
Propiedades del refrigerante Hexametildisiloxano

Fluido	Formula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
Hexametildi- siloxano	$C_6H_{18OSi_2}$	Toxico	Muy Alto	0	6

Nota. Información obtenida de Merck, (2024)

III. MATERIAL Y MÉTODO

3.1. Material

En la ejecución del presente proyecto de investigación fue conveniente emplear distintos programas que faciliten el procesamiento de la información obtenida y la realización de cálculos de una manera más eficiente. En primera instancia se utilizó del software Engineering Equation Solver (EES), que proporciona las propiedades termodinámicas de diversos fluidos en distintos puntos de estudio. Posteriormente con los datos obtenidos fue necesario utilizar Microsoft Excel, como una herramienta de automatización de cálculos y generación de gráficos y tablas. Por último, Microsoft Word, que nos permitió la organización y síntesis de la información recopilada.

Otro pilar importante dentro del desarrollo de la investigación fueron las fuentes secundarias como libros académicos, informes de tesis, revistas científicas de instituciones especializadas, estos documentos nos permitieron tener una visión concreta del tema en estudio.

3.2. Método

3.2.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es cuantitativo, no-experimental, descriptiva causal explicativo, el cual busca encontrar las causas que caracterizan a la variable independiente (evaluación energética del yacimiento geotermal de Crucero) que afectan, modifican o influyen en la variable dependiente, en este caso la potencia efectiva generada por la central geotérmica híbrida y se describe bajo qué aspectos ocurre esa influencia.



- O1 : Evaluación energética del yacimiento geotermal de Crucero
- O2 : Potencia efectiva generada por la central geotermia híbrida
- G. E : Central geotérmica híbrida ubicada en Yacimiento Geotermal de Crucero
- \longrightarrow : Influencia

3.2.2. Principio de funcionamiento del sistema híbrido flash binario integrado

Como se ha mencionado anteriormente el funcionamiento de este tipo de centrales se basa en el aprovechamiento del recurso geotérmico mediante la combinación de dos tipos de sistemas: Sistema Flash y sistema Binario o Rankine CRO.

El sistema Flash aprovecha directamente el recurso geotérmico, mientras que, el sistema binario aprovecha el calor residual para realizar trabajo en un segundo fluido orgánico cuya temperatura de ebullición es baja.

La interacción entre estos dos sistemas hace necesario la utilización de distintos equipos (bombas, turbinas, condensadores, intercambiadores de calor, etc.), lo que posteriormente genera procesos isoentálpicos e isentrópicos dentro de los estados evaluados.

Para lograr el objeto de estudio es necesario determinar las propiedades termodinámicas en cada estado, considerando como punto de partida la extracción del recurso geotérmico y como punto final la reinyección del fluido geotermal en el pozo.

A continuación se muestran los distintos estados que atraviesan el fluido geotérmico y el fluido de trabajo secundario (refrigerante).

3.2.2.1. Determinación de estados sistema Flash

a. Estado 1:

Este estado se refiere a la caracterización recurso geotérmico del reservorio geotérmico de la localidad de Crucero. Este reservorio posee una temperatura profunda de 240 °C y su composición es líquido dominante, este tema se explora con mayor detalle en el Capítulo IV:

$$\begin{aligned}h_1 &= h(T_1/x_1) \text{ kJ/kg} \\P_1 &= P(T_1/x_1) \text{ bar} \\x_1 &= 0 \text{ (Líquido saturado)}\end{aligned}$$

b. Estado 2:

Separador flash

Entre el pozo geotérmico y la turbina de vapor se ubica un separador, cuya función es estrangular el fluido geotérmico, generándose una fracción de vapor y una fracción de líquido para posteriormente ser separados. Dicho estrangulamiento se considera un proceso isoentálpico pues no existe trabajo ni intercambio de calor sobre el fluido.

$$h_1 = h_2$$

En cálculos posteriores del Capítulo IV se muestra que cuando $T_2 = 170 \text{ °C}$ se alcanza un desempeño óptimo en la central, por lo que se determina la presión y calidad mediante:

$$P_2 = P(T_2/h_2) \text{ bar}$$

$$X_2 = P(T_2/h_2)$$

Además en relación los flujos másicos se tiene que:

$$m_1 = m_2 \text{ kJ/kg}$$

c. Estado 3 y 4:

Luego de obtener la calidad, se establece la siguiente relación para obtener el flujo másico de vapor y líquido:

$$m_4 = m_2 * x_2$$

$$m_3 = m_2 - m_4$$

- m_4 : Flujo de vapor saliente del separador
- m_3 : Flujo de líquido saliente del separador
- m_2 : Flujo total saliente del pozo geotérmico

Tanto la presión como la temperatura a la salida del separador (parte líquida y vapor) se consideran iguales a la entrada del separador.

$$T_2 = T_3 = T_4$$

$$P_2 = P_3 = P_4$$

d. Estado 5:

Turbina con vapor

El flujo de vapor saliente del estado 4 ingresa a una turbina, en donde se expande hasta una presión de escape $P_5 = 1.5$ bar, cuyo cálculo se demuestra en el Capítulo IV. Cabe resaltar que en primera instancia se considera un proceso isentrópico, es decir, un proceso adiabático y reversible.

$$S_4 = S_{5i}$$

$$h_{5i} = h(P_5/S_{5i}) \text{ kJ/kg}$$

En segunda instancia se consideramos una eficiencia adiabática $n_t = 90\%$ para hallar la entalpia real a la salida de la turbina.

$$n_{TV} = \frac{h_4 - h_{5r}}{h_4 - h_{5i}}$$

$$h_{5r} = h_4 - n_t * (h_4 - h_{5i})$$

- n_{TV} : Eficiencia adiabática turbina de vapor
- h_4 : Entalpia a la entrada de la turbina de vapor
- h_{5i} : Entalpia ideal a la salida de la turbina de vapor
- h_{5r} : Entalpia real a la salida de la turbina de vapor

Otro parámetro importante a determinar es la temperatura T_{5r} , pues con ella se determina la temperatura de trabajo de la turbina binaria en el Loop 1.

$$T_{5r} = T(P_5/h_{5r}) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$X_{5r} = X(P_5/h_{5r})$$

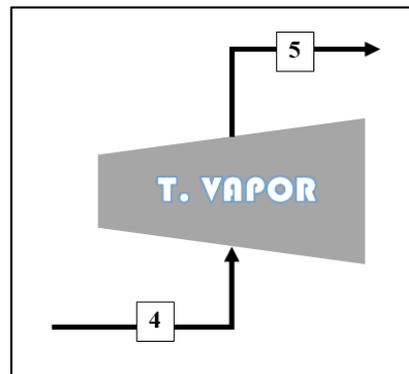
El flujo másico a la entrada de la turbina es el mismo que a la salida $m_4 = m_5$. Para el cálculo de la potencia de la turbina, se considera la siguiente relación:

$$W_{TV} = m_4 * (h_4 - h_{5r})$$

- W_t : Potencia mecánica producida por la turbina

Figura 9.

Esquema de turbina de vapor



e. Estado 6:

El flujo saliente de la turbina de vapor en el estado 5 se encuentra con una calidad X_{5r} muy alta, es decir, en gran mayoría es vapor, por lo que pasa por un evaporador, terminando como líquido saturado y en donde transfiere su calor para evaporar al refrigerante que circula por el Loop 1.

$$T_6 = T_{5r}$$

$$P_6 = P_{5r}$$

$$X_6 = 0$$

$$h_6 = h(T_6/x_6) \text{ kJ/kg}$$

f. Estado 7:

Luego de pasar por el evaporador el fluido geotérmico en estado líquido saturado, ingresa a un precalentador donde transfiere energía calórica al refrigerante que circula en el Loop 1. Se estimó una temperatura de salida $T_7 = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ con la cual se reinyecta al pozo.

$$P_6 = P_7$$

$$h_7 = h(P_7/T_7) \text{ kJ/kg}$$

g. Estado 8:

El flujo másico calculado en el estado 3, el cual es líquido saturado, ingresa a un evaporador ubicado en el Loop 2, en donde transfiere su poder calorífico para evaporar el refrigerante que circula por este ciclo.

$$P_3 = P_8$$

$$m_3 = m_8$$

La incógnita en este punto es determinar el valor de la entalpía h_8 y temperatura T_8 , los cuales se obtienen luego de realizar un balance de energía en el equipo Evaporador y Precalentador.

h. Estado 9:

El fluido que sale del evaporador ingresa al precalentador en donde cede parte de su energía térmica al refrigerante que circula en el Loop 2. Se estima una temperatura de salida de $T_9 = 85 \text{ °C}$ con la cual se reinyecta al pozo.

$$P_8 = P_9$$

$$m_9 = m_3$$

$$h_9 = h(P_9/T_9) \text{ kJ/kg}$$

3.2.2.2. Determinación de estados sistema binario – Loop 1

a. Estado “c”:

Se refiere al punto donde el refrigerante sale del condensador, es importante establecer una temperatura óptima de condensación, considerando principalmente las características de los refrigerantes y las condiciones medioambientales de la zona. Se ha visto conveniente fijar la temperatura de condensación en $T_c = 35 \text{ °C}$, de donde se obtiene lo siguiente:

$$X_c = 0$$

$$h_c = h(T_c/x_c) \text{ kJ/kg}$$

$$P_c = P(T_c/x_c) \text{ bar}$$

b. Estado “a” y “e”:

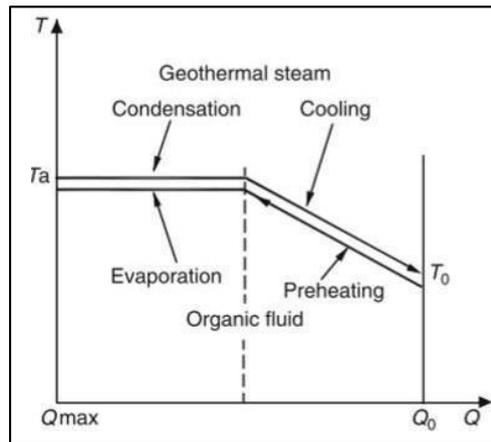
Precalentador y evaporador:

Son intercambiadores de calor en donde un fluido caliente, en este caso el vapor que proviene del estado 5, transfiere su energía calorífica a un fluido frío, que en nuestro tema de estudio hace referencia a los refrigerantes orgánicos.

La Figura 10, indica que cuando el fluido caliente es vapor e ingresa al evaporador, este no sufre descensos en su temperatura, es decir, solo se condensa, saliendo del evaporador a la misma temperatura y presión. Situación similar rige al fluido frío (refrigerante), que ingresa al evaporador como liquido saturado y sale de este como vapor saturado a la misma temperatura y presión de su ingreso.

Figura 10.

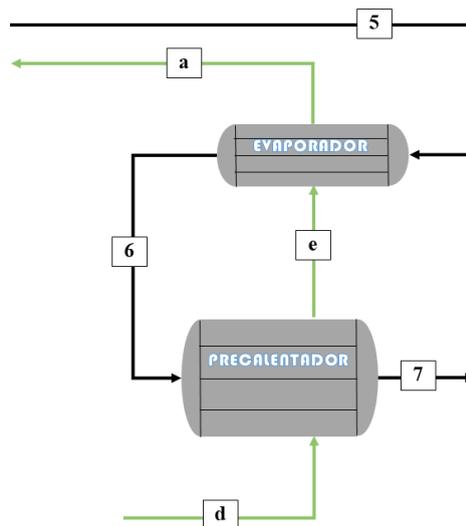
Diagrama T-Q cuando el fluido caliente es vapor



Nota. Información obtenida de Pulido, 2017

Figura 11.

Esquema evaporador y precalentador Loop binario 1



Otro punto a considerar es la “mínima diferencia de temperaturas” entre los dos fluidos que intercambian calor o **pinch point**, para cálculos se ha considerado un valor de 5°C.

De lo mencionado podemos establecer la siguiente relación para el **estado “e”**, el cual hace referencia al ingreso del refrigerante al evaporador:

$$\begin{aligned}T_a &= T_e = T_{5r} - 5^\circ C \\X_e &= 0 \\h_e &= h(T_e/x_e) \text{ kJ/kg} \\P_e &= P(T_e/x_e) \text{ bar}\end{aligned}$$

También se establece la siguiente relación para el **estado “a”**, el cual hace referencia a la salida del refrigerante en el evaporador:

$$\begin{aligned}T_a &= T_{5r} - 5^\circ C \\X_a &= 1 \\h_a &= h(T_a/x_a) \text{ kJ/kg} \\P_a &= P(T_a/x_a) \text{ bar}\end{aligned}$$

c. Estado “b”:

Turbina binaria Loop 1:

El flujo de vapor de refrigerante saliente del estado “a” ingresa a una turbina binaria, da un proceso isentrópico y se expande hasta la presión de condensación P_c , inicialmente se considera un proceso isentrópico con la siguiente relación:

$$\begin{aligned}P_b &= P_c \\S_b &= S_a \\h_{bi} &= h(P_b/S_b) \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

Posteriormente se considera una eficiencia adiabática $n_t = 90\%$ para hallar la entalpia real a la salida de la turbina binaria

$$h_{br} = h_a - n_{TB1} * (h_a - h_{bi})$$

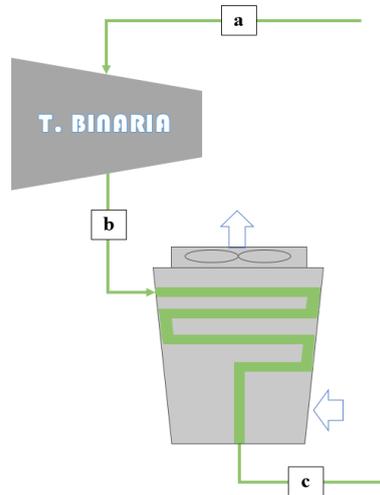
- n_t : Eficiencia adiabática de la turbina binaria Loop 1
- h_a : Entalpia a la entrada de la turbina binaria Loop 1
- h_{bi} : Entalpia ideal a la salida de la turbina binaria Loop 1
- h_{br} : Entalpia real a la salida de la turbina binaria Loop 1

El flujo másico que recorre el ciclo es el mismo en todos los estados del Loop 1, es decir $m_a = m_b = m_c = m_d = m_e$. El cálculo de la potencia de la turbina se obtiene con:

$$W_{TB1} = m_4 * (h_4 - h_{5r})$$

Figura 12.

Esquema turbina y torre de refrigeración del Loop binario 1



d. Estado “d”:

Bomba en el Loop 1:

El flujo que sale del estado “c” ingresa a una bomba en donde se produce un proceso isentrópico, y la presión del refrigerante se eleva hasta la misma presión del precalentador y evaporador, por lo que la entalpia ideal se define:

$$P_d = P_e$$

$$S_d = S_c$$

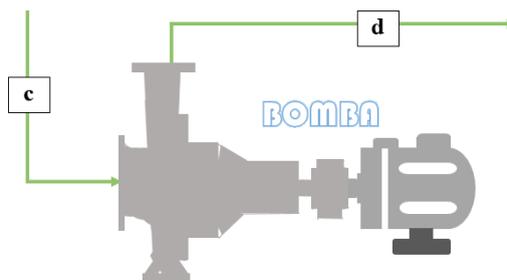
$$h_{di} = h(P_d/S_d) \text{ kJ/kg}$$

Considerando una irreversibilidad $n_{B1} = 90\%$ en la bomba, obtenemos la entalpia real h_{dr}

$$h_{dr} = \frac{h_{di} - h_c}{n_{B1}} + h_c$$

Figura 13.

Esquema bomba del Loop binario 1



Para el cálculo de la potencia de la bomba binaria del Loop 1, se tiene:

$$W_{B1} = m_d * (h_{dr} - h_c)$$

Una vez obtenidas las entalpías de cada estado del ciclo binario en el Loop 1, se puede obtener el flujo másico del refrigerante que circula por este ciclo, aplicando un balance de energía en el evaporador y precalentador. La ecuación queda definida:

$$m_e = m_5 * \left(\frac{h_{5r} - h_7}{h_a - h_{dr}} \right)$$

- m_5 : Flujo másico de vapor geotermal a la salida de la turbina de vapor
- h_{5r} : Entalpia real a la salida de la turbina de vapor
- h_7 : Entalpia saliente del precalentador
- h_a : Entalpia del refrigerante a la entrada de la turbina binaria
- h_{dr} : Entalpia real del refrigerante a la salida del conjunto motor bomba

3.2.2.3. Determinación de estados sistema binario – Loop 2

a. Estado “w”:

Se refiere al punto donde el refrigerante sale del condensador, por lo que se fija una temperatura $T_w = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, al igual que lo considerado en el Loop 1.

$$X_w = 0$$

$$h_w = h(T_w/x_w) \text{ kJ/kg}$$

$$P_w = P(T_w/x_w) \text{ bar}$$

b. Estado “x” y “u”:

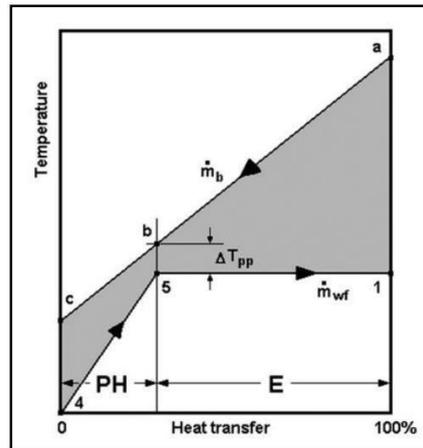
Precalentador y evaporador:

En este intercambiador de calor el fluido caliente que ingresa al evaporador es líquido saturado a una elevada temperatura, por lo que su evaluación es distinta a lo visto anteriormente en el Loop 1.

La Figura 14 representa el intercambio de calor entre un fluido caliente y un fluido frío, de lo que se deduce que el fluido caliente (recurso geotérmico) reduce su temperatura de forma gradual durante su paso por el evaporador y el precalentador. Caso contrario sucede con el fluido frío (refrigerante), que eleva su temperatura de forma gradual durante su paso por el precalentador, sin embargo durante su paso por el evaporador mantiene su temperatura constante, es decir, solo cambia su estado de líquido a vapor saturado.

Figura 14.

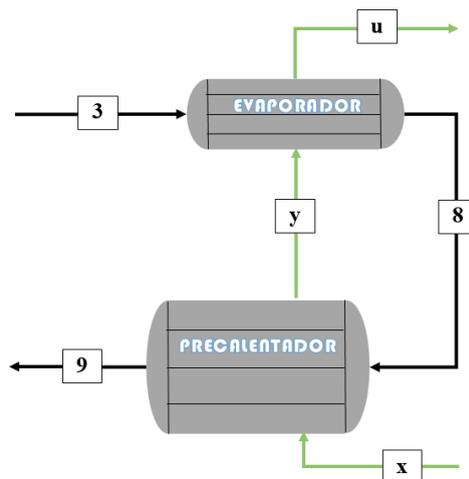
Diagrama T-Q cuando el fluido caliente es liquido



Nota. Información obtenida de Pulido, 2017

Figura 15.

Esquema evaporador-precalentador Loop binario 2



De la Figura 15 se concluye que debe establecerse un **pinch point** entre el **estado 8** y el **estado “y”**, por lo que la temperatura T_8 siempre debe ser superior a la temperatura T_y en por lo menos 5°C . Para lograr esto es necesario realizar una serie de iteraciones, modificando la temperatura T_y y efectuar cálculos hasta obtener un pinch point adecuado.

De lo mencionado anteriormente podemos establecer la siguiente relación para el **estado “y”**, el cual hace referencia al ingreso del refrigerante al evaporador:

$$T_y = T_u$$

$$X_y = 0$$

$$h_y = h(T_y/x_y) \text{ kJ/kg}$$

$$P_y = P(T_y/x_y) \text{ bar}$$

También se establece la siguiente relación para el **estado “u”**, el cual hace referencia a la salida del refrigerante en el evaporador:

$$T_y = T_u$$

$$X_u = 1$$

$$h_u = h(T_u/x_u) \text{ kJ/kg}$$

$$P_u = P(T_u/x_u) \text{ bar}$$

c. Estado “v”:

Turbina binaria Loop 2:

El flujo de vapor de refrigerante saliente del **estado “u”** ingresa a una turbina binaria, da un proceso isentrópico y se expande hasta la presión de condensación P_w , inicialmente se considera un proceso isentrópico con la siguiente relación:

$$P_v = P_w$$

$$S_v = S_u$$

$$h_{vi} = h(P_v/S_v) \text{ kJ/kg}$$

Posteriormente se considera una eficiencia adiabática $n_{TB2} = 90\%$ para hallar la entalpia real a la salida de la turbina binaria

$$h_{vr} = h_u - n_{TB2} * (h_u - h_{vi})$$

- n_{TB2} : Eficiencia adiabática de la turbina binaria Loop 2
- h_u : Entalpia a la entrada de la turbina binaria Loop 2
- h_{vi} : Entalpia ideal a la salida de la turbina binaria Loop 2
- h_{vr} : Entalpia real a la salida de la turbina binaria Loop 2

Al tratarse de un ciclo cerrado se tiene que $m_u = m_v = m_w = m_x = m_y$. El cálculo de la potencia de la turbina se obtiene con:

$$W_{TB2} = m_u * (h_u - h_{vr})$$

d. Estado “x”:

Bomba en el Loop 2:

El flujo que sale del estado “w” ingresa a una bomba en donde se produce un proceso isentrópico, y la presión del refrigerante se eleva hasta la misma presión del precalentador y evaporador, por lo que la entalpia ideal se define:

$$P_x = P_y$$

$$S_x = S_w$$

$$h_{xi} = h(P_x/S_x) \text{ kJ/kg}$$

Considerando una eficiencia de $n_{B2} = 90\%$ en la bomba binaria 2, calculamos la entalpia real h_{xr} :

$$h_{xr} = \frac{h_{xi} - h_w}{n_{B2}} + h_w$$

La potencia de la bomba binaria del Loop 2, queda definida por:

$$W_{B2} = m_x * (h_{xr} - h_w)$$

Una vez obtenidas las entalpías de cada estado, se calcula el flujo másico del refrigerante en el ciclo mediante un balance de energía en el conjunto evaporador y precalentador:

$$m_x = m_3 * \frac{h_3 - h_9}{h_u - h_{xr}}$$

- m_3 : Flujo másico de líquido saturado proveniente del separador flash
- h_3 : Entalpia de líquido saturado proveniente del separador flash
- h_9 : Entalpia saliente del precalentador
- h_u : Entalpia del refrigerante a la entrada de la turbina binaria
- h_{xr} : Entalpia real del refrigerante a la salida del conjunto motor bomba

Luego de obtener el flujo másico del refrigerante que circula en el Loop 2, es necesario conocer la temperatura T_8 para corroborar si cumple con la restricción del pinch point, para ello se efectúa un balance de energía en el evaporador, con la cual se obtiene la entalpia h_8 . La ecuación se muestra a continuación:

$$h_8 = h_3 - \frac{m_y * (h_u - h_y)}{m_3}$$

- h_8 : Entalpia de líquido geotérmico a la salida del evaporador
- h_3 : Entalpia de líquido saturado proveniente del separador
- m_3 : Flujo masico de liquido saturado proveniente del separador
- m_y : Flujo másico del refrigerante a la salida del precalentador
- h_u : Entalpia del refrigerante a la salida del evaporador
- h_y : Entalpia del refrigerante a la salida del precalentador

3.2.2.4. Cálculo en el Condensador refrigerado por aire (CRA)

El condensador refrigerado por aire cumple un papel importante dentro del proceso binario, pues es el encargado de realizar la condensación del refrigerante que sale de la turbina para luego dar inicio al ciclo nuevamente.

De acuerdo a (AccuWeather, 2024) la temperatura ambiente de la región Moquegua ronda aproximadamente los 23 °C y cuenta con una humedad relativa del 70%, con estos datos podemos establecer la entalpía del aire que ingresa al CRA. Los parámetros de salida del aire se basan en aproximaciones de acuerdo a la temperatura de ingreso del fluido caliente, es decir, la temperatura del refrigerante que sale de la turbina binaria.

Al aplicar un balance de energía en el CRA del Loop 1 se obtiene la siguiente relación:

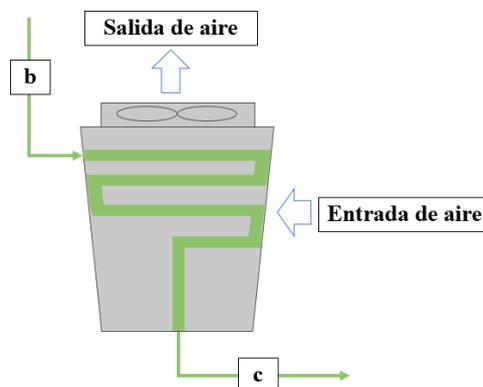
$$m_{\text{aire}} * (h_{\text{salida aire}} - h_{\text{entrada aire}}) = m_b * (h_{br} - h_c)$$

Mientras que para el Loop 2 se tiene:

$$m_{\text{aire}} * (h_{\text{salida aire}} - h_{\text{entrada aire}}) = m_v * (h_{vr} - h_w)$$

Figura 16.

Esquema del Condensador refrigerado por aire CRA



3.2.3. Resumen de estados y procesos

A continuación, se muestra una serie de tablas en donde se detalla los procesos que atraviesan los fluidos de trabajo. El proceso del ciclo flash abarca desde la extracción del recurso hasta su reinyección al reservorio, mientras que el ciclo binario es un ciclo cerrado cuyos procesos comprenden desde que el refrigerante se encuentra en un estado de condensado hasta que es expandido en la turbina.

Tabla 7.
Procesos experimentados por el fluido geotérmico en el ciclo flash

PROCESO	DESCRIPCIÓN
1-2	Estrangulamiento del recurso geotermal.
2-3	Separación del recurso fase líquida.
2-4	Separación del recurso fase vapor.
4-5	Expansión del vapor en la turbina, generación de trabajo.
5-6	Condensación del vapor, cede calor en el Evaporador del Loop 1.
6-7	Caída de temperatura al intercambiar calor en el Precalentador.
3-8	Caída de temperatura, cede calor en el Evaporador del Loop 2.
8-9	Caída de temperatura, cede calor en el Precalentador del Loop 2.

Tabla 8.
Procesos experimentados por el fluido refrigerante en el Loop binario 1

PROCESO	DESCRIPCIÓN
a-b	Expansión del vapor refrigerante en la turbina binaria.
b-c	Condensación del vapor refrigerante en el CRA del Loop 1.
c-d	Elevación de la presión por medio de una bomba en el Loop 1.
d-e	Subida de temperatura, absorción del calor en el Precalentador.
e-a	Evaporación del refrigerante, absorción del calor en el Evaporador.

Tabla 9.
Procesos experimentados por el fluido refrigerante en el Loop binario 2

PROCESO	DESCRIPCIÓN
u-v	Expansión del vapor refrigerante en la turbina binaria
v-w	Condensación del vapor refrigerante en el CRA del Loop 2.
w-x	Elevación de la presión por medio de una bomba en el Loop 2.
x-y	Subida de temperatura, absorción del calor en el Precalentador.
y-u	Evaporación del refrigerante, absorción del calor en el Evaporador.

3.2.4. Cálculo de indicadores energéticos

Los principales indicadores energéticos que permiten evaluar el desempeño de una central geotérmica híbrida flash binaria integrada se encuentran relacionados a las potencias generadas, eficiencias y la evaluación del consumo específico de refrigerante

3.2.4.1. Potencia generada

Es la cantidad total de potencia generada sin descontar la potencia consumida por los sistemas auxiliares, para hallar este parámetro se suma la potencia obtenida por la turbina en la etapa flash y las turbinas en los ciclos binarios.

$$P_{generada} = W_{TV} + W_{TB1} + W_{TB2}$$

3.2.4.2. Potencia consumida

Es la potencia que la planta geotérmica utiliza para operar sus sistemas auxiliares, en nuestro caso de estudio corresponde a la potencia consumida en las bombas del Loop 1 y Loop 2.

$$P_{consumida} = W_{B1} + W_{B2}$$

3.2.4.3. Potencia neta

Es la potencia neta, se refiere a la potencia que queda disponible luego de haber evaluado la potencia generada y la potencia consumida. Dicha potencia queda descrita mediante la siguiente ecuación:

$$P_{neta} = P_{generada} - P_{consumida}$$

3.2.4.4. Potencia efectiva

Para el cálculo de la potencia efectiva es necesario conocer la eficiencia del generador, el cual está acoplado al rotor de la turbina para que el movimiento giratorio (mecánico) se convierta en energía eléctrica, dicho factor se considera en un 0.95. Del mismo modo también es importante considerar la eficiencia mecánica del movimiento, el cual se considera 0.95. Entonces se tiene la siguiente ecuación.

$$P_{efectiva} = P_{neta} * 0.95 * 0.95$$

3.2.4.5. Consumo específico de refrigerante

Este indicador relaciona el consumo de refrigerante con la potencia neta, es decir, indica la cantidad de refrigerante necesaria para producir 1 MWh de energía, es un indicador de referencia, pero no es el más importante, sus unidades son [kg/MWh]

$$\text{Consumo específico} = \frac{m_a + m_u}{P_{neta}}$$

3.2.4.6. Eficiencia térmica

La eficiencia térmica indica la capacidad de la central geotérmica flash binaria integrada para convertir la energía térmica aportada por el recurso geotérmico en energía eléctrica. Este indicador relaciona la potencia neta con el calor suministrado por el fluido geotérmico en los intercambiadores de calor (evaporador y precalentador). La eficiencia térmica se determina mediante el siguiente modelo:

$$n_{th} = \frac{P_{neta}}{Q_{suministrado}}$$

$$n_{th} = \frac{P_{neta}}{m_a * (h_a - h_{dr}) + m_u * (h_u - h_{xr})}$$

- m_a : Flujo másico del refrigerante en el Loop binario 1
- m_u : Flujo másico del refrigerante en el Loop binario 2
- h_a : Entalpía del refrigerante a la salida del evaporador en el Loop binario 1
- h_{dr} : Entalpía del refrigerante a la entrada del precalentador en Loop binario 1
- h_u : Entalpía del refrigerante a la salida del evaporador en el Loop binario 2
- h_{xr} : Entalpía del refrigerante a la entrada del precalentador en Loop binario 2

3.2.4.7. Eficiencia de utilización

Este indicador relaciona la potencia neta en la planta con la potencia teórica máxima que se puede obtener a partir del aprovechamiento del recurso geotérmico. Se calcula:

$$n_u = \frac{P_{neta}}{P_{teorica}}$$

$$n_u = \frac{P_{neta}}{m_1 * [h_1 - h_0 - T_0 * (S_1 - S_0)]}$$

- m_1 : Flujo másico del recurso geotérmico en el estado 1
- h_1 : Entalpía del recurso geotérmico en el estado 1
- S_1 : Entropía del recurso geotérmico en el estado 1
- T_0 : Temperatura del agua en estado muerto o estado 0
- h_0 : Entalpía del agua en estado muerto o estado 0

En donde el **Estado 0**, también llamado estado muerto hace referencia a agua en condiciones ambientales cuya temperatura puede considerarse $T_0 = 23 \text{ °C}$.

3.2.5. Optimización de parámetros

La optimización de parámetros se realiza con el fin de obtener el mejor desempeño de la central geotérmica en términos de potencia generada y eficiencia, para ello es necesario realizar una serie de iteraciones tomando en consideración tres puntos claves, los cuales se detallan a continuación:

- En primera instancia se evalúa la temperatura óptima del separador (T_2), este parámetro es importante pues aquí ocurre el fraccionamiento del recurso geotérmico en vapor y líquido saturado. Una mala elección de este parámetro produciría una inestabilidad en el sistema, ocasionando que la energía calorífica del recurso geotérmico no sea aprovechada correctamente.
- En segunda instancia se evalúa la presión de escape en la turbina de vapor (P_5), este parámetro tiene una relación directa con la temperatura de entrada del refrigerante a la turbina binaria del Loop 1 (T_a). Tener una presión de escape elevada ocasionaría una disminución en la potencia generada en la turbina de vapor, pero, produciría un aumento de la potencia generada en la turbina binaria del Loop 1, por este motivo es necesario evaluar el comportamiento de la potencia en este punto.
- En tercera instancia se evalúa la temperatura de ingreso del refrigerante al evaporador del Loop 2 (T_y), para ello se realiza una serie de iteraciones buscando cumplir la restricción del Pinch point con la temperatura (T_8), temperatura de salida del recurso geotérmico del evaporador.

3.2.6. Metodología para la evaluación económica

Para la evaluación económica se tendrá en consideración lo siguiente:

- La central se considera como despachada en base
- Se considera un periodo de evaluación de 20 años
- Los montos de dinero serán evaluados en dólares.
- El interés considerado para la evaluación de 20 años será el 12%
- La evaluación económica se realizará con el refrigerante con un mejor desempeño en potencia efectiva
- La factibilidad del proyecto será evaluada de acuerdo con el VAN y el TIR

3.2.6.1. Valor actual neto (VAN)

Para calcular el VAN, tanto los ingresos como los egresos se considerarán uniformes, los ingresos serán considerados positivos y los egresos negativos. Se tiene lo siguiente:

$$VAN = - Inversion - Egresos * (P/A, i, n) + Ingresos * (P/A, i, n)$$

Donde:

- $(P/A, i, n)$: Factor económico “Deducción del valor presente dado un valor uniforme anual”

Para el cálculo del factor se tendrá en cuenta lo siguiente

$$P/A = \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}$$

- i : Interés o tasa de descuento
- n : Tiempo de estudio(años)

3.2.6.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

El TIR hace referencia a la tasa porcentual que indica la rentabilidad promedio anual que genera el capital que permanece invertido en el proyecto, dicho de otra manera, es aquella que utilizada como tasa de descuento genera un VAN = 0. Teniendo en cuenta lo anterior se tiene:

$$VP_D = VP_R$$

$$0 = -VP_D + VP_R$$

$$0 = - Inversion - Egresos * (P/A, i, n) + Ingresos * (P/A, i, n)$$

Donde:

- VP_D : Valor presente del desembolso inicial, “inversión”
- VP_R : Valor presente de los ingresos y egresos

3.2.6.3. Costos

a. Costo de inversión

Para el tema de inversión se tendrá en cuenta 8 etapas:

- **Estudios y exploración**

Para determinar el potencial del reservorio geotérmico del yacimiento geotérmico Crucero de Moquegua se tiene que realizar los estudios pertinentes, entre los cuales están el geológico, el geofísico y geoquímico entre otros muchos más. Para que los resultados obtenidos sean confiables se tiene que realizar en áreas diferentes, 4 perforaciones de 4” con una profundidad de 1.5 km.

- **Desarrollo**

Habiendo concluido los estudios, para poder garantizar la producción de la potencia de la central geotérmica híbrida, se realizarán 2 perforaciones para la entrada y salida del flujo geotérmico de 9” a 1.5 km de profundidad.

- **Concesión**

Corresponde al 1% del presupuesto de inversión.

- **Equipamiento de superficie**

Corresponde al medio de transporte del flujo geotérmico, agua y refrigerante, que consta de tuberías, bridas, codos de fierro negro o inoxidable de acuerdo a la zona de trabajo. También hace mención al sistema eléctrico e instrumentación (sistema de fuerza y sistema de control) de los motores y aislamiento térmico.

- **Equipo de generación**

Consta principalmente de las turbinas de vapor y de refrigerante, de las bombas de alimentación e intercambiadores de calor.

- **Obras civiles**

Corresponde a los edificios u oficinas para el control operacional y seguridad. Del mismo modo hacen mención a las bases que necesitan equipos de gran tamaño.

- **Montaje e instalación**

Corresponde a la coordinación de ingeniería para la puesta en marcha de planta.

- **Subestación y transformador**

Corresponde a los equipos necesarios para la venta de energía a la red. Véase el detalle en el Anexo 23.

- b. Costo de operación y mantenimiento**

Para el tema de la operación de la planta geotérmica híbrida se está considerando 47 personas para su funcionamiento, dicho personal está resumido en el Anexo 22.

3.2.6.4. Ingresos

Para la determinación de los ingresos se tiene que tener en cuenta los precios por potencia de punta y por energía de la Subestación Moquegua 138 KV declarados por Osinergmin en la resolución N° 051-2024-OS/CD, del mismo modo la potencia efectiva de la planta y la energía generada durante un año.

a. Ingreso por venta de energía

Para la venta de energía se tiene que tener en cuenta el precio de energía de barra en horas punta y fuera de punta de la Subestación Moquegua 138KV, los cuales son 24.39 ctm.S/ /kWh y 22.85 ctm.S/ /kWh.

b. Ingreso por venta de potencia

Para la venta de potencia se tiene que conocer el precio de potencia de barra de la Subestación Moquegua 138 KV, el cual es 22.12 S/ /kW-mes.

c. Ingreso por la no emisión de CO₂

Conociendo las propiedades del gas natural, Heat Rate promedio de centrales termoeléctricas cuyo combustible sea el gas natural y además el precio de acuerdo al banco mundial, por la no emisión de toneladas de CO₂, podemos calcular dicho ingreso.

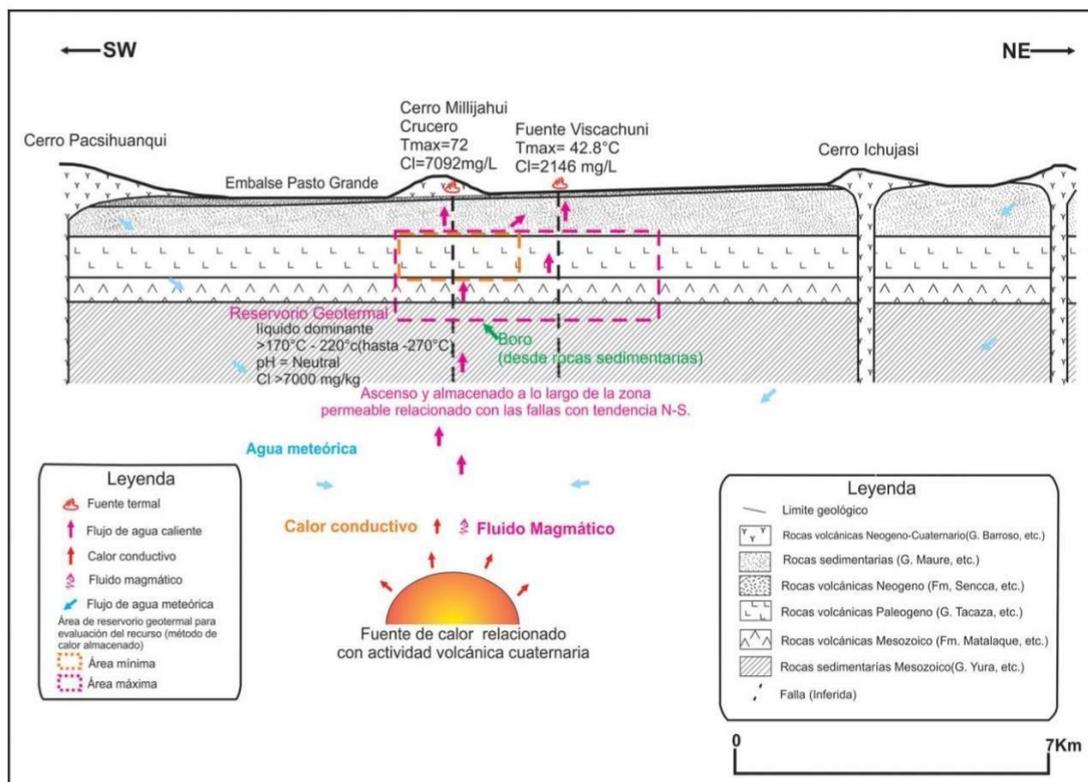
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del recurso geotérmico en la localidad de Crucero

La localidad de Crucero es una de las zonas con mayor potencial para el aprovechamiento del recurso geotérmico dentro de la región Moquegua. En un estudio realizado por la (Dirección de geología ambiental y riesgo geológico, 2014), denominado “Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la Región Moquegua”, se determinó que la temperatura del reservorio en la localidad de Crucero se encuentra en el rango de 230-240 °C y que la composición del fluido es líquido dominante.

Figura 17.

Circulación de fluidos en la zona geotermal de Crucero, Moquegua



Nota. Obtenido de Dirección de geología ambiental y riesgo geológico, 2014

De lo mencionado se determinan las características termodinámicas del recurso geotérmico extraído del reservorio, donde $T_1 = 240 \text{ °C}$, al tratarse de líquido dominante $x_1 = 0$, y la presión es de saturación $P_1 = 33.48 \text{ bar}$. Partiendo de esto se obtiene un parámetro energético, siendo la entalpía del recurso $h_1 = 1037.6 \text{ kJ/kg}$.

Pulido Garcia, (2017) sostiene que para un reservorio de nuestras características el flujo másico extraíble se encuentra entre el intervalo de 42-70 kg/s, por lo que, para efectos de

cálculo se optó por fijar un valor medio de $m_1 = 50 \text{ kg/s}$, considerando un único pozo de producción.

Otro parámetro a considerar es la temperatura de reinyección, si esta es muy baja puede afectar directamente la temperatura del reservorio ocasionando que la entalpía de este decaiga. Diversos autores proponen escoger una temperatura de reinyección entre los 70-100 °C, por lo que consideramos un valor medio de $T_7 = T_9 = 85 \text{ °C}$.

4.2. Datos de partida

Se muestra una compilación de los datos de partida para realizar los cálculos, estos datos incluyen principalmente los parámetros del fluido geotérmico entrante, rendimientos de equipos mecánicos-eléctricos y parámetros asumidos:

Tabla 10
Datos de partida

Parámetros		Valor	Unidad
Temperatura del recurso geotérmico	T_1	240	°C
Presión del recurso geotérmico	P_1	33.48	bar
Entalpía del recurso geotérmico	h_1	1037.6	kJ/kg
Calidad del recurso geotérmico	X_1	0	
Flujo másico recurso geotérmico	m_1	50	kg/s
Temperatura de reinyección	T_7, T_9	85	°C
Temperatura de condensado (binario)	T_c, T_u	35	°C
Pinch Point (Evaporador-precalentador)	ΔT	5	°C
Eficiencia turbina de vapor	n_{TV}	90%	
Eficiencia turbina binaria	n_{TB1}, n_{TB2}	90%	
Eficiencia Bombas	n_{B1}, n_{TB1}	90%	
Temperatura estado muerto	T_0	23	°C
Temperatura aire ambiental	T_{aire}	23	°C

4.3. Evaluación de criterios para la optimización de parámetros

Dentro del ciclo estudiado existen parámetros que no pueden ser determinados en una primera instancia, por lo que su cálculo y su optimización se basan en una serie de

iteraciones buscando obtener el mejor desempeño de la central y cumplir con las leyes termodinámicas.

De acuerdo a lo mencionado en el Capítulo III, los parámetros que deben ser evaluados son la temperatura en el separador (T_2), la presión de escape de la turbina de vapor (P_5) y la temperatura de entrada del refrigerante al evaporador del Loop 2 (T_y), esta última es la misma que la temperatura de ingreso a la turbina binaria del Loop 2 (T_u).

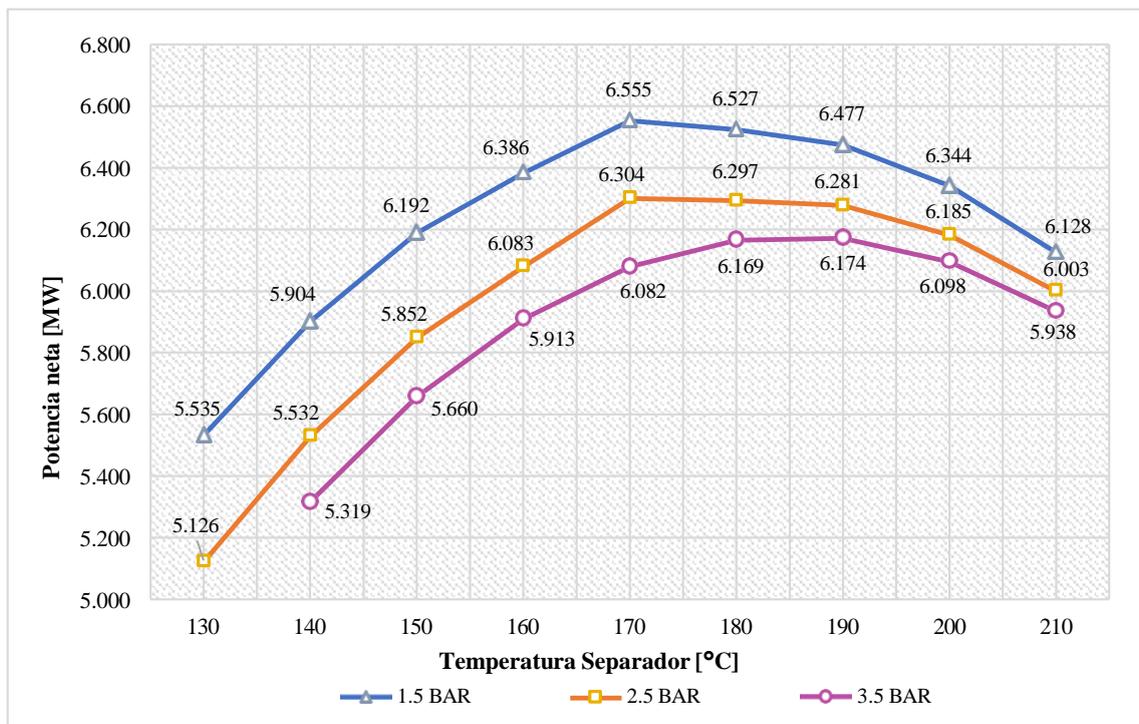
Para realizar los cálculos se ha escogido al **Isopentano** como refrigerante modelo, sin embargo, el mismo comportamiento se replica en los otros refrigerantes evaluados. Los cuadros resumen de resultados para el Isopentano se muestran en los Anexos 1,2 y 3.

4.3.1. Evaluación de la Potencia neta a diferentes temperaturas en el separador y presiones de escape variables en la turbina de vapor

Para determinar la temperatura optima de separador (T_2), se optó por realizar una serie iteraciones modificando dicho valor desde los 130-210 °C, cada una de ellas fue evaluada a una presión de escape de la turbina de vapor (P_5) de 1.5 bar, 2.5 bar y 3.5 bar con el fin de obtener la curva característica de la potencia neta.

Figura 18.

Potencia neta del Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape variables



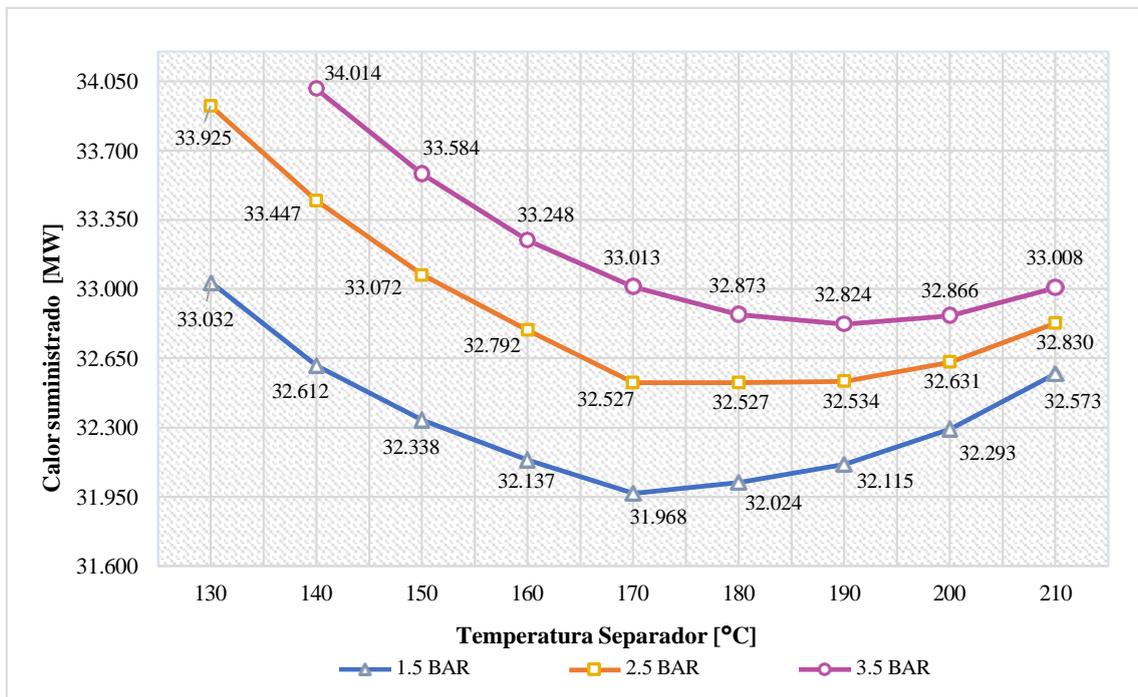
En la Figura 18 se muestran las curvas características de la potencia generada al usar Isopentano, se aprecia que cuando la presión de escape de la turbina de vapor (P_5) es 1.5 bar se obtiene la mayor potencia generada en cada temperatura de separador (T_2) evaluada, mientras que, para la presión de 3.5 bar se obtiene la potencia generada más baja. En las curvas de 1.5 y 2.5 bar se determina que el punto donde la potencia neta es máxima es cuando la temperatura del separador (T_2) es 170°C , luego de esto la potencia decrece gradualmente. En conclusión la potencia neta máxima generada por el Isopentano en estas condiciones es 6.555 MW.

4.3.2. Evaluación del calor suministrado al Isopentano a diferentes temperaturas en el separador y presiones de escape variables en la turbina de vapor:

Otro parámetro importante a evaluar es el calor que el fluido geotérmico suministra al refrigerante, en este caso el Isopentano, este parámetro se evaluó a distintas temperaturas de separador (T_2) y presiones de escape (P_5).

Figura 19.

Calor suministrado al Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape en la turbina de vapor



En la Figura 19 se muestran las curvas características del calor que el fluido geotérmico suministra al refrigerante al pasar por el Evaporador y precalentador, esta curva muestra un comportamiento inverso a la curva desarrollada en la potencia neta. Cuando la presión

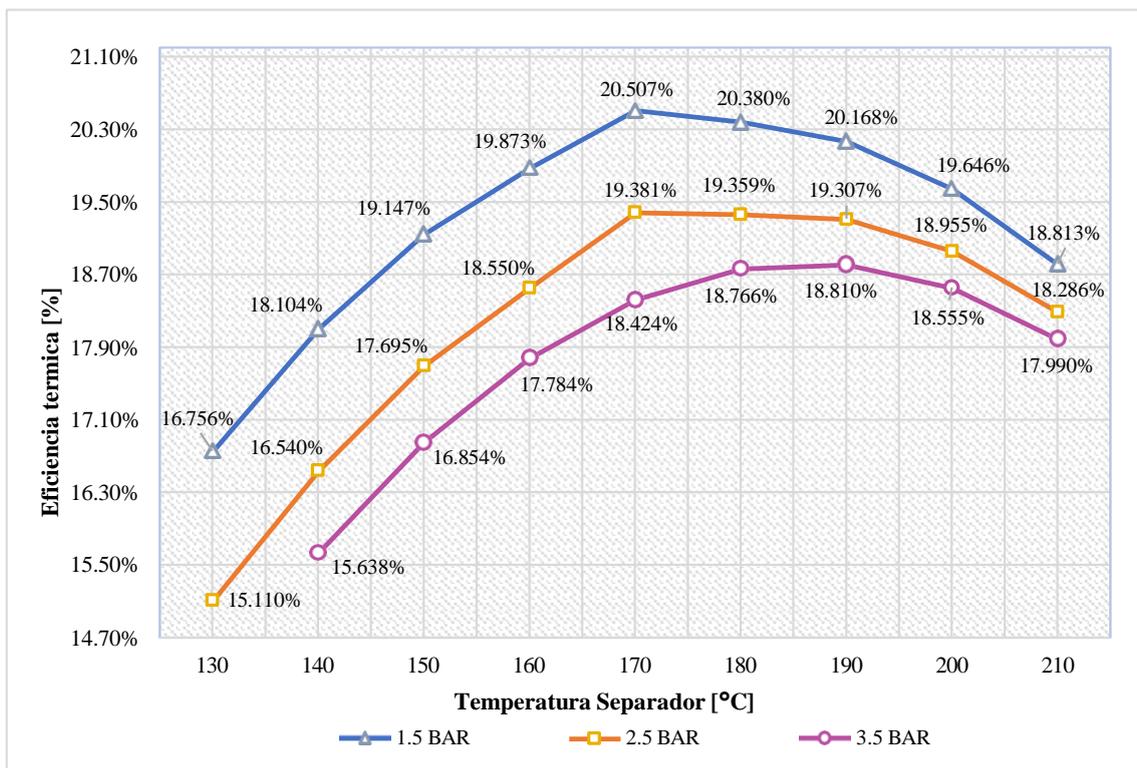
es 3.5 bar el calor suministrado alcanza sus valores máximos, por el contrario, cuando la presión de escape (P_5) es 1.5 bar, el calor alcanza sus valores más bajo, en donde el punto más bajo es 31.968 MW de calor suministrado cuando la temperatura del separador (T_2) es 170°C. El tener un valor bajo en este punto no representa algo negativo pues el calor suministrado se encuentra ligado a la eficiencia, tal como se explicará en el siguiente apartado.

4.3.3. Evaluación del rendimiento térmico a diferentes temperaturas en el separador y presiones de escape variables en la turbina de vapor

Este indicador energético relaciona la Potencia neta generada (P_{net}) y el Calor suministrado (Q_{sum}), a continuación se muestra la curva característica de la eficiencia térmica del Isopentano.

Figura 20.

Eficiencia térmica del Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape en la turbina de vapor



En la Figura 20 se muestra una curva de la eficiencia térmica describe un comportamiento similar a la curva de la Potencia neta. Cuando la presión de escape en la turbina de vapor (P_5) es 1.5 bar, se obtienen los puntos de eficiencia más altos para cada temperatura

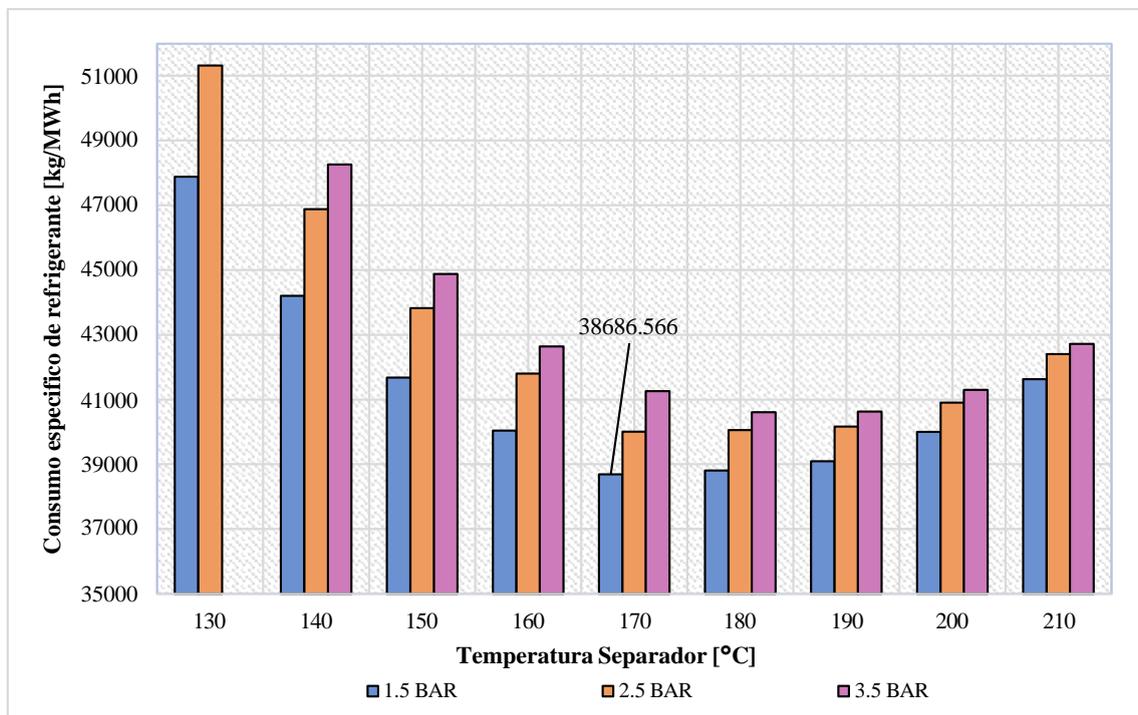
evaluada, caso contrario a lo que sucede cuando (P5) es 3.5 bar. Además se determina que cuando P5 es 1.5 bar y T2 es 170 °C se obtiene la mejor eficiencia térmica en el Isopentano alcanzando 20.507%. Como se mencionó anteriormente la eficiencia se encuentra ligada a la potencia neta y al calor suministrado mediante la ecuación $\eta_{th} = P_{net}/Q_{sum}$, por lo que si se genera una potencia elevada y el calor suministrado es bajo, se dice que el sistema es eficiente térmicamente pues gran parte del calor es aprovechado para posteriormente ser convertido en energía eléctrica.

4.3.4. Evaluación del consumo específico del refrigerante a diferentes temperaturas en el separador y presiones de escape variables en la turbina de vapor

El último criterio a evaluar es el consumo específico del refrigerante, este indicador hace referencia a la cantidad de refrigerante necesario para producir 1MWh. A las temperaturas variables en el separador (T2) se ha optado por evaluar el consumo específico de refrigerante en función a la potencia neta.

Figura 21.

Consumo específico de Isopentano a diferentes temperaturas de separador y presiones de escape en la turbina de vapor



De la Figura 21 se determina que el mayor consumo de refrigerante se da cuando la presión de expansión en la turbina de vapor (P5) es 3.5 bar, se observa que para esta

presión los consumos son mayores en cada temperatura evaluada con respecto a las otras presiones. Por otro lado, los valores más bajos en consumo se obtienen cuando (P_5) es 1.5 bar, alcanzando su punto mínimo cuando la temperatura del separador (T_2) es 170 °C con un consumo de 38686.566 kg/MWh, esto quiere decir que aquí se necesita menos cantidad de refrigerante para generar la misma cantidad de energía en comparación con los otros puntos evaluados.

4.3.5. Parámetros optimizados

A continuación, se muestra la Tabla 11, la cual contiene los valores optimizados luego de realizar la evaluación de criterios, estos valores serán utilizados para analizar los otros refrigerantes de estudio:

Tabla 11
Parámetros optimizados

Parámetros		Valor	Unidad
Temperatura de separador	T_2	170	°C
Presión de escape turbina de vapor	P_5	1.5	bar
Temperatura de entrada turbina binaria 1	T_a	106	°C

Cabe acotar que la temperatura (T_a), como se ha detallado anteriormente surge al aplicar el pinch point de 5°C a la temperatura de escape de la turbina (T_{5R}) cuyo valor se encuentra alrededor de los 111 °C al tener una presión de 1.5 bar.

Como se mencionó anteriormente otro criterio a optimizar es la temperatura de entrada del refrigerante al evaporador del Loop 2 (T_y), el cual debe ser menor en por lo menos 5°C que la temperatura del fluido geotermal que sale del evaporador (T_8), estas temperaturas no pueden ser optimizadas de manera general, pues varían de acuerdo al refrigerante utilizado.

En el caso del Isopentano, refrigerante modelo con el que se realizó la evaluación de criterios, se ejecutaron una serie de iteraciones en donde se determinó que la temperatura (T_y) es 120 °C, mientras que para la temperatura (T_8) se obtuvo un valor de 125.40 °C, de esta forma se cumple el pinch point. Para el resto de refrigerantes la temperatura T_y se muestra desde el Anexo 4 al Anexo 21.

A continuación, se muestra una tabla sobre los estados obtenidos en el Isopentano, y en el Anexo 32 se muestra el esquema completo de una central geotérmica flash binaria:

Tabla 12.

Balance energético de Isopentano

ESTADO	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kgC)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	125.40	n.a	42.225	526.40	1.5830
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	8.19	106.00	1	37.48	119.43	-0.3910
bi	1.29	57.94	n.a	37.48	51.42	-0.3910
br	1.29	61.59	n.a	37.48	58.22	-0.3706
c	1.29	35.00	0	37.48	-327.13	-1.6150
di	8.19	35.21	n.a	37.48	-326.10	-1.6150
dr	8.19	35.70	n.a	37.48	-324.96	-1.6110
e	8.19	106.00	0	37.48	-146.52	-1.0920
LOOP BINARIO 2						
u	10.85	120	1	32.96	140.44	-0.3621
vi	1.29	63.10	n.a	32.96	61.06	-0.3621
vr	1.29	67.31	n.a	32.96	68.99	-0.3386
w	1.29	35.00	0	32.96	-327.13	-1.6150
xi	10.85	35.31	n.a	32.96	-325.66	-1.6150
xr	10.85	36.02	n.a	32.96	-324.03	-1.6100
y	10.85	120	n.a	32.96	-106.39	-0.9899

4.4. Fluidos CRO evaluados

Los fluidos de operación utilizados en el ciclo binario o CRO deben ser fluidos que cuenten con un punto de ebullición inferior al del agua. A continuación, se muestran los fluidos ORC que se estudiarán, dichos fluidos han sido escogidos en base a sus propiedades termodinámicas (Presión y temperaturas críticas), su utilización en centrales geotérmicas a nivel mundial, y en algunos casos para comparar sus factores de seguridad:

Tabla 13
Temperatura y presión crítica de los refrigerantes de estudio

Fluido	Formula	Tc (°C)	Pc (bar)
Propano	C_3H_8	96.68	42.47
Isobutano	iC_4H_{10}	134.70	36.40
n-Pentano	C_5H_{12}	196.50	33.64
Isopentano	iC_5H_{12}	187.20	33.70
n-Hexano	C_6H_{14}	234.70	30.58
R-123	$C_2HCl_3F_3$	183.70	36.68
R-134A	CF_3CH_2F	101.00	40.59
R-245fa	$CF_3CH_2CHF_2$	154.00	36.51
Hexametildisiloxano (MM)	$C_6H_{18OSi_2}$	245.50	19.39
Amoniac	NH_3	132.30	113.30

4.5. Comparación de desempeño energético en los fluidos CRO

Se han realizado los cálculos para cada refrigerante usando los datos de partida mostrados en la Tabla 10 y los parámetros optimizados mostrados en la Tabla 11. Los resultados de los cálculos para cada refrigerante se muestran entre desde el Anexo 4 al Anexo 21.

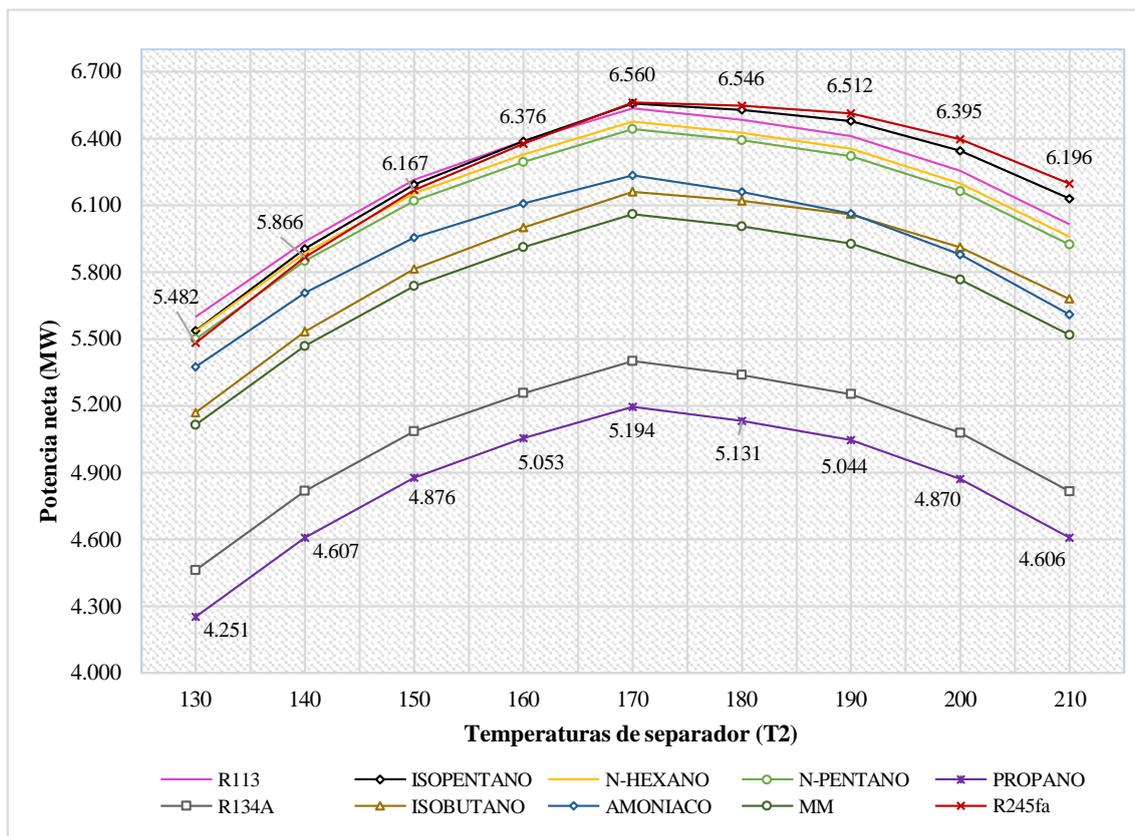
Para determinar que refrigerante es el más óptimo para operar en la central diseñada, se ha optado evaluar los siguientes indicadores:

- Potencia neta
- Potencia efectiva
- Eficiencia térmica o de Planta
- Eficiencia de utilización
- Consumo específico de refrigerante
- Indicadores de seguridad (Toxicidad, Inflamabilidad, ODP, GWP)

En el apartado 4.3.5 “Parámetros optimizados” se determinó una temperatura de separador (T_2) 170 °C y una presión de escape en turbina de vapor (P_5) 1.5 bar, se tomó como refrigerante modelo al Isopentano. Sin embargo, es necesario evaluar el comportamiento de los demás refrigerantes. A continuación, se muestran gráficas de curvas características de potencia neta y eficiencias en los refrigerantes evaluados.

Figura 22.

Potencia neta de los fluidos ORC evaluados a distintas temperaturas T_2



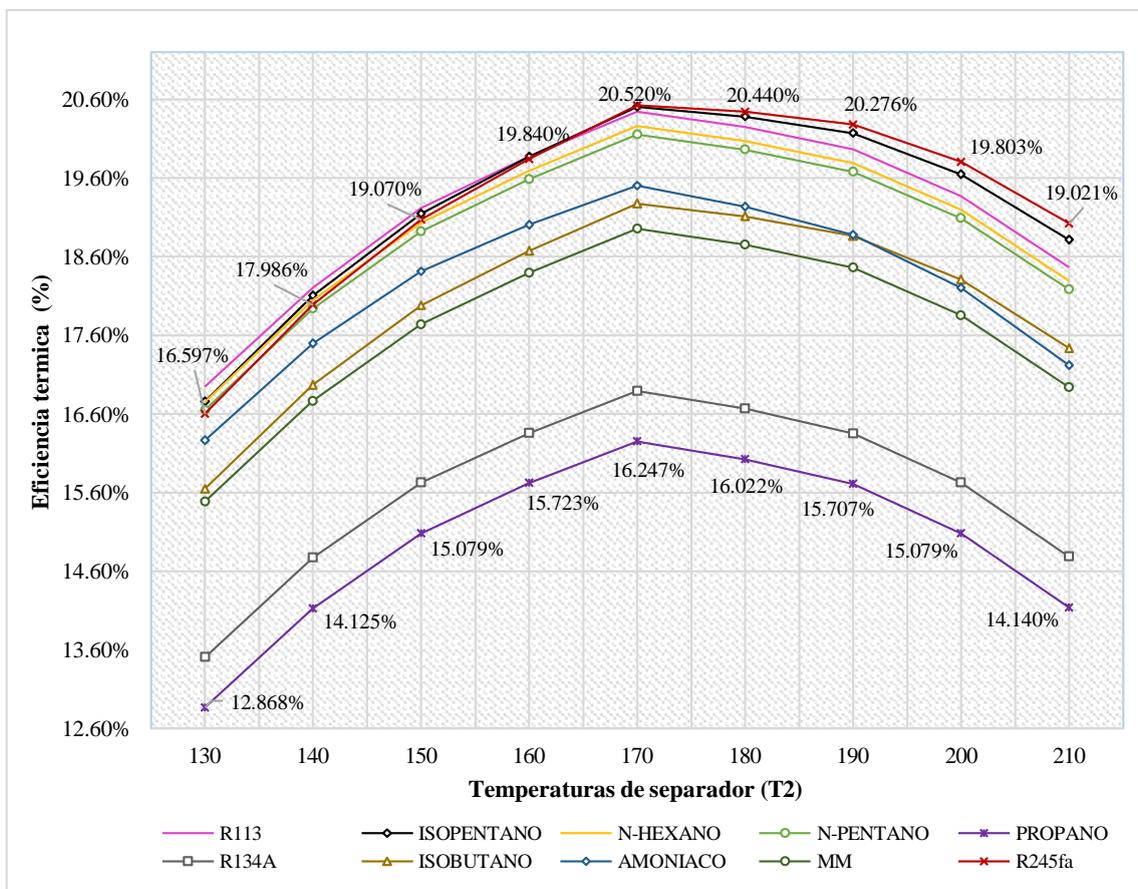
En la Figura 22 se aprecian las curvas características de potencia neta para cada refrigerante evaluado, de este grafico se deduce que cada refrigerante alcanza el valor máximo de potencia cuando la temperatura de separador (T_2) es 170 °C, lo que confirma la teoría planteada inicialmente. El refrigerante que del cual se obtiene una mayor potencia neta es el R-245fa con 6.560 MW, seguido del Isopentano con 6.555 MW, en último lugar se encuentra el propano cuyo pico máximo alcanza los 5.194 MW.

Entre el Isopentano y el R-245fa, la diferencia de potencias netas generadas es insignificante por lo que es necesario evaluar otros indicadores.

Otro indicador a evaluar es la eficiencia térmica o también conocida como eficiencia de planta, en la Figura 23, se describe un comportamiento similar a las curvas mostradas en la Figura 22. El fluido R-245fa alcanza una eficiencia de 20.520%, seguido del Isopentano con una eficiencia térmica de 20.507%, la diferencia entre ellos es alrededor de 0.013%, por lo que aún no podría determinarse el mejor entre ambos. Por otro lado, el Propano es el menos eficiente térmicamente con 16.247%. En todos los casos evaluados los valores máximos se alcanzan con una $T_2=170$ °C.

Figura 23.

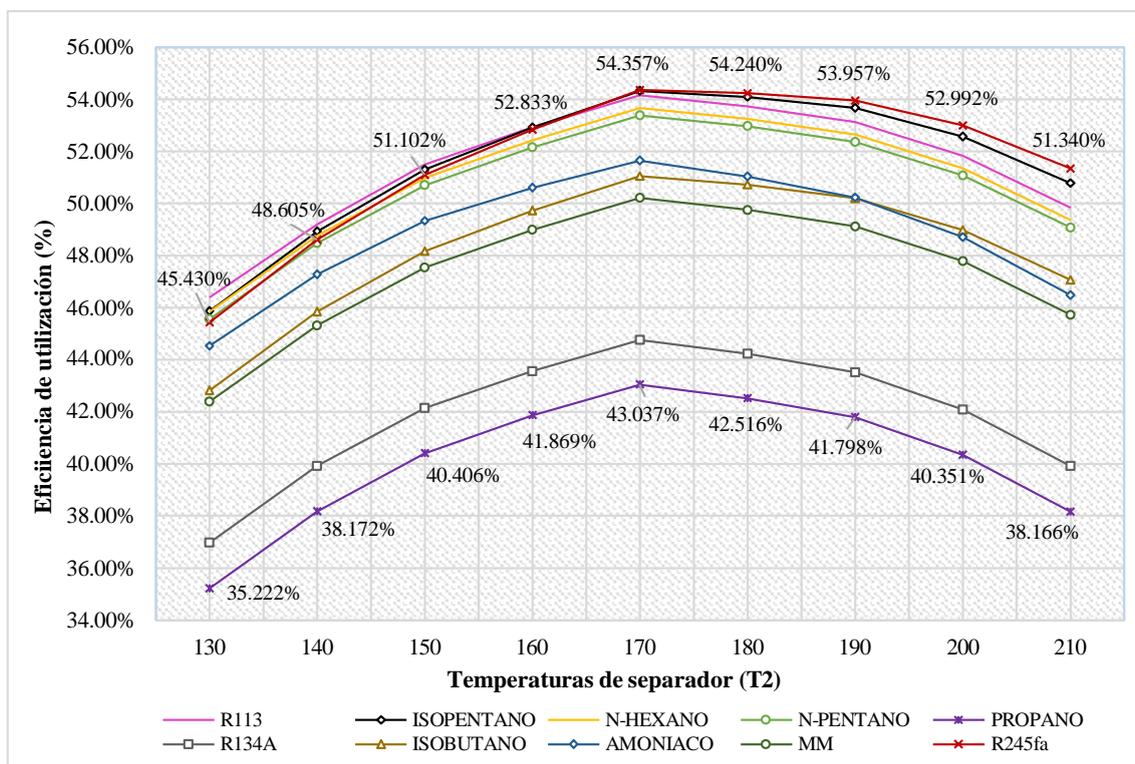
Eficiencia térmica de los fluidos ORC evaluados a distintas temperaturas T_2



El tercer indicador evaluado es la eficiencia de utilización, el cual relaciona la Potencia neta, con una potencia teórica máxima. La Figura 24, muestra al propano con la menor eficiencia de utilización con 43.037%. Por otro lado, el R-245fa alcanza una eficiencia de 54.357% mientras que el Isopentano 54.321%, la diferencia entre ambos sigue siendo estrecha por lo que la elección del refrigerante de mejor desempeño, se tiene que realizar comparando el consumo específico de cada refrigerante y factores de seguridad.

Figura 24.

Eficiencia de utilización de los fluidos ORC evaluados a distintas temperaturas T_2



Como se determinó en la evaluación anterior, cada refrigerante obtiene su mejor desempeño energético cuando la temperatura del separador (T_2) es 170 °C, lo que se confirma lo afirmado inicialmente. A continuación, se muestra una tabla que recopila los indicadores energéticos obtenidos para cada refrigerante cuando estos alcanzan su desempeño óptimo:

Tabla 14
Resultados de desempeño energético para cara fluido CRO evaluado

Fluido	Pot. generada (MW)	Pot. neta (MW)	Pot. efectiva (MW)	Eficiencia térmica (%)	Eficiencia de utilización (%)	Consumo específico CRO (kg/MWh)
Propano	6.318	5.194	4.674	16.247	43.037	67163.124
Isobutano	6.804	6.160	5.544	19.271	51.048	47612.801
n-Pentano	6.583	6.442	5.797	20.151	53.378	37816.802
Isopentano	6.739	6.555	5.900	20.507	54.321	38686.566
n-Hexano	6.533	6.476	5.829	20.259	53.665	36814.836

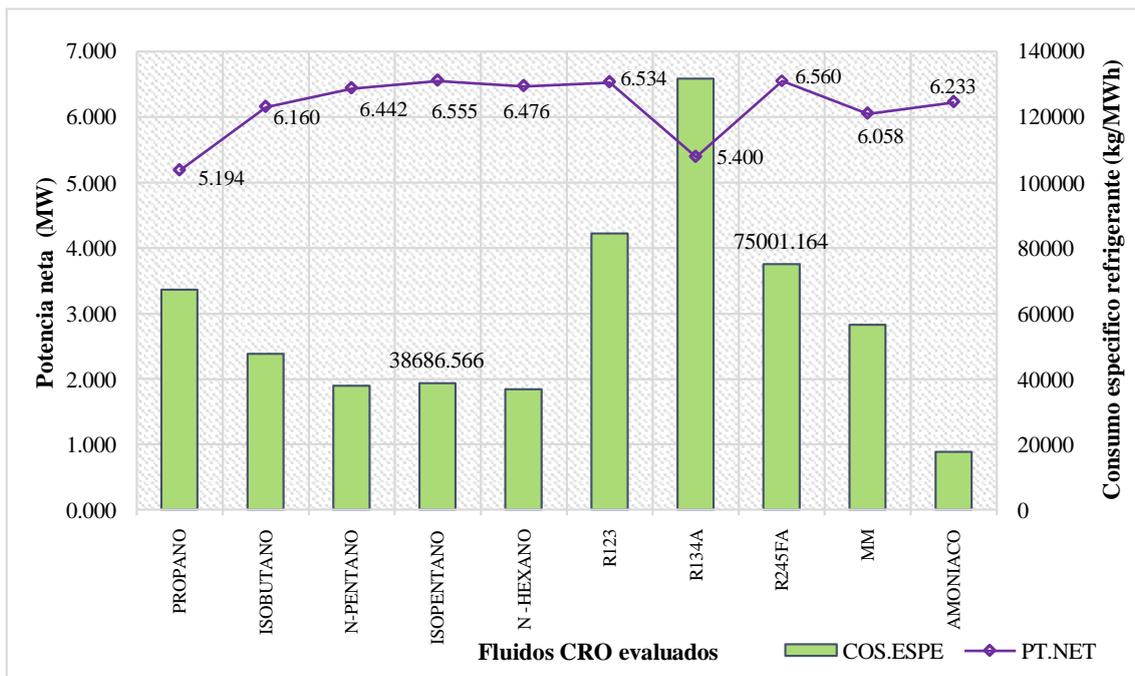
R-123	6.754	6.534	5.881	20.440	54.145	84401.558
R-134A	6.531	5.400	4.860	16.891	44.744	131605.503
R-245fa	6.923	6.560	5.904	20.520	54.357	75001.164
(MM)	6.117	6.058	5.452	18.950	50.198	56513.744
Amoniaco	6.811	6.233	5.610	19.498	51.648	17721.815

De acuerdo a la Tabla 14 y a la Figura 22, Figura 23 y Figura 24 se concluyó que el R-245fa y el Isopentano son los refrigerantes de mejor desempeño energético en términos de Potencia neta generada, eficiencia térmica y eficiencia de utilización, y al tener resultados muy similares en ambos refrigerantes es necesario evaluar otros indicadores.

A continuación, se presenta la Figura 25, se detalla la relación entre la Potencia neta generada y el consumo específico del fluido CRO. Para el caso del Isopentano se obtiene una potencia generada de 6.555 MW y un consumo específico de 38,686.566 kg/MWh, mientras que para el R-245fa se obtiene 6.560 MW y un consumo de 75,001.164 kg/MWh. Esto indica que para generar la misma cantidad de energía el R-245fa consume aproximadamente el doble de flujo refrigerante en comparación al Isopentano.

Figura 25.

Consumos específicos de fluido CRO y Potencia neta generada



En última instancia se realiza una comparación de las Propiedades de seguridad de cada refrigerante, según lo mostrado en las Figuras 08, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, en donde se obtiene que el R-245fa es toxico, tiene un ODP=0, y un GWP=1030, mientras que el Isopentano tiene una toxicidad muy baja, ODP=0 y GWP=3.

De lo mencionado se puede concluir que el Isopentano es el refrigerante de mejor desempeño para la central flash binaria integrada que se dimensionó, pues no solo valores significativos en cuanto a indicadores de desempeño energético, sino que también las propiedades de seguridad que presenta, hacen más seguro su manejo, además de ser uno de los refrigerantes que menor impacto ambiental ocasionan.

4.6. Evaluación económica

Conforme a (Medina & Guillen , 2018), a nivel internacional el costo por MW instalado en una central geotérmica es de 3 170 000 USD. Teniendo en consideración los resultados mostrados anteriormente, la evaluación económica se realizará con el refrigerante de mejor desempeño, que en nuestro caso es el Isopentano, por lo que el costo de inversión de la central geotérmica será determinado por la potencia instalada de dicho refrigerante.

La potencia instalada del Isopentano es 6.7388 MW, por lo que el coste de inversión para dicha central geotérmica híbrida sería 21 361 996 USD. De acuerdo con (Pinedo Mines & Ramirez Pintado, 2015), el costo de inversión de una central geotérmica está influenciada por 3 etapas, la primera que es el reconocimiento que corresponde el 9% de la inversión, la segunda que es la exploración, que corresponde un 24% de la inversión y por último el desarrollo que corresponde en su mayoría el mayor porcentaje de la inversión, siendo este un 66%.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se tiene la siguiente tabla:

Tabla 15.

Etapas de construcción para la inversión

ETAPAS DE CONSTRUCCION	DESCRIPCION	CANTIDAD (USD)
	COSTO TOTAL	21,361,996
	RECONOCIMIENTO	2,002,190
ETAPA I	Estudios geotécnicos	1,561,708
	Estudios geoquímicos	320,350
	Estudios menores	120,131
	EXPLORACION	5,200,494
ETAPA II	Perforación de pozos exploratorios	5,200,494
	DESARROLLO	14,159,312
	Concesión	140,191
	Perforación de pozos productores	3,900,370
ETAPA III	Equipamiento de superficie	4,771,453
	Equipo de generación	4,362,571
	Obras civiles	214,624
	Montaje e instalación	214,624
	Subestación y transformador	555,478

4.6.1. Costos

Conforme a (Pinedo & Ramírez , 2015), el costo de operación y mantenimiento de una central geotérmica se puede aproximar en un 5% del costo de la inversión. Además, sostiene que el gasto anual más significativo se obtiene en los sueldos de empleados y obreros. Por lo que se tiene la siguiente tabla.

Tabla 16.

Costos anuales

DESCRIPCION	CANTIDAD (USD/AÑO)
Personal de planta	413,088
Mantenimiento	170,896
Gastos administrativos	238,453
Leyes del estado	245,663
TOTAL	1,068,100

4.6.2. Ingresos

4.6.2.1. Ingresos por venta de potencia y energía

Para determinar los ingresos anuales, relacionados a la venta de energía y potencia, se ha tomado en cuenta los precios de barra para suministros de energía y potencia de la Subestación Moquegua 138 KV. Conforme a (OSINERGMIN, 2024), estos precios están situados de la siguiente manera.

Tabla 17.

Precios de barra de la Sub. Estación Moquegua 138 KV

DESCRIPCION	PRECIO	
PEMP	24.39	ctm.S/ /kWh
PEMF	22.85	ctm.S/ /kWh
PPM	22.12	S/ /kW-mes

Nota. Información obtenida de Osinergmin, 2024

- **PEMP:** Precio de la Energía a Nivel Generación en Horas de Punta para las Barras de Referencia de Generación, expresado en ctm. de S/ /kWh
- **PEMF:** Precio de la Energía a Nivel Generación en Horas Fuera de Punta para las Barras de Referencia de Generación, expresado en ctm. de S/./kWh
- **PPM:** Precio de la Potencia de Punta a Nivel Generación, expresado en S/./kW-mes

A continuación, se presenta los precios en USD, para el cambio del dólar se ha considerado el cambio promedio declarado por el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), que es 3.73.

Tabla 18.

Precios de barra de la Sub. Estación Moquegua 138 KV expresados en USD

DESCRIPCION	PRECIO	
PEMP	65.39	USD /MW-h
PEMF	61.26	USD /MW-h
PPM	65,233.24	USD /MW-año

En la Tabla 19, se muestra un resumen de los ingresos, considerando las horas punta desde las 18 horas hasta las 23 horas y la hora fuera de punta todo lo demás. También es importante mencionar que no se considera 12 meses de trabajo continuo para la central geotérmica, debido a que un mes se considerará su parada para el mantenimiento respectivo de los equipos

Tabla 19.

Detalle por venta de energía y potencia

INGRESO POR VENTA DE ENERGIA	
Energía anual HP (MWh)	9,735
Subtotal energía anual (USD)	636,549
Energía anual HFP (MWh)	36,992
Subtotal energía anual HFP	2,266,155
Total por venta de energía (USD)	2,902,703
INGRESO POR VENTA DE POTENCIA	
Potencia (MW)	5.90
Total por venta de potencia (USD)	384,870
TOTAL DE INGRESOS (USD)	3,287,573

4.6.2.2. Ingresos por CO2 dejado de emitir:

Para determinar el ingreso por la no emisión de CO2, se tendrá en cuenta, primero lo siguiente:

De acuerdo a (Viloche, n.d.):

- La densidad del gas natural es 0.75 kg/m^3
- El PCI del gas natural es el 90% del PCS, el PCS puede estar entre 38 a 42 MJ/m^3 .

Entonces el PCI promedio es:

$$40 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{m}^3}{0.75 \text{ kg}} * \frac{10^3\text{KJ}}{1\text{MJ}} * \frac{1\text{kcal}}{4.18\text{KJ}} = 12\,760 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Conforme a (Gas meridional, 2020):

- El factor de conversión del gas natural de MMBTU a m^3 es 27.096 MMBTU/m^3

(Comisión para la operación ambiental, 2024), sostiene que

- El factor de emisión del gas natural para las emisiones de CO2 es 0.05 kg/MJ , el cual equivaldría a

$$0.05 \frac{\text{kg CO2}}{\text{MJ}} * \frac{1 \text{ Ton}}{10^3\text{kg}} * \frac{10^6\text{MJ}}{1\text{TJ}} = 50 \frac{\text{Ton CO2}}{\text{TJ}}$$

Para el Heat Rate, conforme a (Guevara, 2020),

- El valor promedio para las centrales termoeléctricas que utilizan como combustible el Gas Natural es 9.73 MMBTU/MWh

Para fijar el precio por la no emisión de CO2, (World Bank Group, n.d.) menciona que dicho monto puede oscilar entre $0.81 \frac{\text{USD}}{\text{Ton CO2}}$ a $6.68 \frac{\text{USD}}{\text{Ton CO2}}$, por lo que se considerará $3.745 \frac{\text{USD}}{\text{Ton CO2}}$.

Entonces teniendo en cuenta los valores mencionados anteriormente, se calcula inicialmente la energía anual generada:

$$\mathbf{Energia\ anual = P_{efectiva} * 11\ meses * 30\ dias * 24\ horas}$$

$$\mathbf{Energia\ anual = 5.8999\ MW * 11\ meses * 30\ dias * 24\ horas}$$

$$\mathbf{Energia\ anual = 46\,727\ MWh}$$

Posteriormente se calcula el consumo anual de gas natural:

$$\mathbf{Consumo\ GN\ anual = Energia\ anual * Hear\ Rate}$$

$$\mathbf{Consumo\ GN\ anual = 46\,727\ MWh * 9.73 \frac{\text{MMBTU}}{\text{MWh}}}$$

$$\mathbf{Consumo\ GN\ anual = 454\,656\ MMBTU}$$

Como siguiente paso se determina la cantidad de CO2 dejado de emitir:

$$\text{No Em. CO2} = \text{Factor conversion} * \rho * \text{PCI} * \text{Factor emision} * \text{Consu. GN anual}$$

$$\text{No Em. CO2} = 27.096 \frac{\text{MMBTU}}{\text{m}^3} * 0.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 12\,760 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * 50 \frac{\text{Ton CO2}}{\text{TJ}} * 454\,656 \text{ MMBTU}$$

$$\text{No Em. CO2} = 27.096 \frac{\text{MMBTU}}{\text{m}^3} * 0.75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 12\,760 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * 50 \frac{\text{Ton CO2}}{\text{TJ}} * 454\,656 \text{ MMBTU} * \frac{4.18\text{KJ}}{\text{Kcal}} * \frac{1}{10^9}$$

$$\text{No Em. CO2} = 24\,640 \text{ Ton CO2}$$

Finalmente se determina el ingreso anual por CO2 dejado de emitir:

$$\text{Ingreso anual} = \text{No Emision. CO2} * \text{Precio CO2}$$

$$\text{Ingreso anual} = 24\,640 \text{ Ton CO2} * 3.745 \frac{\text{USD}}{\text{Ton CO2}}$$

$$\text{Ingreso anual} = 92\,278 \text{ USD}$$

4.6.3. Valor Actual Neto

Para el cálculo del VAN se hará uso del Excel para los factores económicos.

$$\text{VAN} = -\text{Inversion} - \text{Egresos} * (P/A, i, n) + \text{Ingresos} (P/A, i, n)$$

$$\text{VAN} = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * (P/A, 12\%, 20) + 3\,287\,573 * (P/A, 12\%, 20) + 92\,278 * (P/A, 12\%, 20)$$

$$\text{VAN} = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * 7.4694 + 3\,287\,573 * 7.4694 + 92\,278 * 7.4694$$

$$\text{VAN} = -4\,094\,501$$

4.6.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Teniendo en cuenta la definición de TIR, que es aquella que utilizada como descuento genera un VAN = 0, se hará uso de la interpolación entre un valor negativo y un valor positivo para hallar el valor intermedio que sea 0.

$$0 = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * (P/A, 4\%, 20) + 3\,287\,573 * (P/A, 4\%, 20) + 92\,278 * (P/A, 4\%, 20)$$

$$0 = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * 13.5903 + 3\,287\,573 * 13.5903 + 92\,278 * 13.5903$$

$$0 < 10\,055\,456$$

Como el monto es mucho mayor que 0, se procede a aumentar el interés compuesto, procedemos a calcular con el 10%.

$$0 = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * (P/A, 10\%, 20) + 3\,287\,573 * (P/A, 10\%, 20) + 92\,278 * (P/A, 10\%, 20)$$

$$0 = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * 8.5136 + 3\,287\,573 * 8.5136 + 92\,278 * 8.5136$$

$$0 > -1\,680\,756$$

Entonces teniendo como datos un valor positivo y un valor negativo, se procede a interpolar.

$$i = 4\% + \frac{(0 - 10\,055\,456) * (10\% - 4\%)}{-1\,680\,756 - 10\,055\,456}$$

$$i = 9.14\%$$

Teniendo en consideración lo calculado, el periodo de retorno de inversión sería

$$PRI = \frac{\textit{Inversion}}{\textit{Ingresos} - \textit{Egresos}}$$

$$PRI = \frac{21\,361\,996}{3\,287\,573 + 92\,278 - 1\,068\,100}$$

$$PRI = 9.24 \text{ años}$$

$$PRI = 9 \text{ años con 3 meses}$$

4.7. Discusión de resultados

Se concuerda con la investigación realizada por (Medina & Guillen, 2018), quienes evaluaron las características del recurso geotérmico en las zonas de Putina y Secoloaque en Moquegua, cuyos reservorios alcanzan una temperatura entre 230-250°C afirmando que para reservorios de estas características, el recurso geotérmico se encuentra como líquido dominante. En base a nuestra investigación pudimos determinar que la temperatura del reservorio en la localidad de Crucero es de 240 °C y que el recurso geotérmico es líquido dominante, por lo que el recurso fue evaluado como líquido saturado, de esta forma se pudo obtener las características del recurso geotermal con una presión de 33.48 bar, una entalpía de 1037.6 kJ/kg y un flujo másico de extracción promedio de 50 kg/s.

Se coincide parcialmente con la investigación realizada por (Pulido, 2017), quien determinó los parámetros de operación de una central geotérmica flash binaria integrada en la Isla Tenerife y cuyo reservorio geotérmico es de 250°C, estableciendo la temperatura de separador (T_2) en 170 °C, presión de escape de la turbina de vapor (P_5) 1.2 bar, y la temperatura de ingreso a turbina binaria del Loop 2 ($T_y = T_u$) en 100 °C, con estos parámetros alcanzó potencias netas de generación en el rango de 6.31-7.24 MW en los refrigerantes evaluados. En base a nuestra investigación y a las iteraciones realizadas se estableció la temperatura $T_2=170$ °C, en este punto se logra un óptimo desempeño entre la fracción de vapor y de líquido obtenido en el separador, por consiguiente se logra un equilibrio entre las potencias generadas en el proceso flash y procesos binarios. En relación a la presión P_5 en nuestro diseño se escogió 1.5 bar debido a un factor de seguridad, mientras que, la temperatura T_y es variable dependiendo del tipo de refrigerante utilizado y buscando que cumpla el pinch point con la T_8 . Por último los valores alcanzados en la potencia generada son similares, para los refrigerantes evaluados se obtienen valores entre 5.194-6.56 MW.

Se concuerda con el trabajo realizado por (Villarino, 2020) y con la investigación de (Pinedo & Ramirez , 2015), cuyas conclusiones determinan que el Isopentano es el refrigerante que ofrece un mejor desempeño en términos de potencia generada y eficiencia energética, además de contar con propiedades que hacen que su manejo sea seguro y amigable con el medio ambiente. De acuerdo a nuestra investigación se ha obtenido al isopentano como el refrigerante de mejor desempeño con una potencia

neta de 6.555 MW y un consumo específico de refrigerante de 38686.566 kg/MWh, a pesar de que con el R-245fa se obtiene una mayor potencia neta 6.560 MW esta diferencia es insignificante considerando que este refrigerante consume 75001.164 kg/MWh, lo que representa aproximadamente el doble de lo consumido por el Isopentano.

Referente a la evaluación económica se coincide con las investigaciones realizadas por (Pulido, 2017) y (Villarino, 2020), en donde concluyen que este tipo de proyectos no son viables, y que esto se debe principalmente a la escasa información que se tiene sobre la construcción y desarrollo de centrales geotérmicas en el Perú, lo cual conllevaría gastos excesivos en el ámbito logístico para la adquisición de los equipos y herramientas necesarias para este tipo de proyectos. Además, el riesgo de exploración es elevado, la posibilidad de encontrar un recurso geotermal que no cumpla con los parámetros de viabilidad influye en muchos inversionistas a no arriesgar su capital. En base a nuestra investigación se determinó una inversión inicial de 21 361 996 USD, VAN de -4 094 501 USD, TIR de 9.14%, PRI de 9 años con 3 meses, lo que nos establece que el proyecto no es rentable económicamente.

Coincidimos con (Tranamil, 2019), que indica que este tipo de tecnología sería más atractiva para los inversionistas, si se combina con otra fuente de energía, esto con la finalidad de aprovechar más recursos energéticos y disminuir el riesgo de inversión. Es importante también mencionar que la adición de otra fuente de energía, por ejemplo, la solar, implicaría una mayor estabilidad en la generación de energía y acceso a más incentivos del estado, para generar una rentabilidad.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se identificaron las características energéticas del recurso geotérmico de Moquegua teniendo este una temperatura profunda de 240 °C, una presión de 33.48 bar, una entalpía de 1037.6 kJ/kg y un flujo másico extraíble de 50 kg/s, la composición del recurso es netamente líquido dominante. Su contenido de CO₂ no es predominante, esto evita la formación de calcita lo que disminuye las incrustaciones en las tuberías de extracción.
- Se determinó la potencia generada de 10 refrigerantes pertenecientes al grupo de los hidrocarburos alcanos, hidrocarburos halogenados y un siloxano. Los refrigerantes con mayor potencia neta generada fueron el R-245fa y el Isopentano con 6.560 MW y 6.555 MW respectivamente. El refrigerante con menor potencia neta generada es el Propano con 5.194 MW.
- Se seleccionó al Isopentano como el refrigerante de mayor desempeño energético con una potencia generada de 6.555 MW, una eficiencia térmica de 20.507%, una eficiencia de utilización de 52.511% y un consumo específico de refrigerante de 38686.566 kg/MWh. Sumado a ello este refrigerante no es corrosivo, y es el refrigerante que menor impacto ambiental ocasiona.
- Conforme a la evaluación económica del refrigerante con mejor desempeño, se tiene que el VAN posee un valor de $-4\,094\,501$ USD y el TIR un valor porcentual de 9.14%, con ambos datos se deduce que el periodo de retorno de inversión se encuentra alrededor de 9 años.

Recomendaciones

- Es innegable mencionar que esta clase de proyectos en el Perú deben tener de manera obligatoria una subvención económica del Estado, para que, de esta manera, el proyecto se vuelva económicamente viable. Esto se puede lograr mediante una subasta de energía.
- El estado debería desarrollar un plan estratégico nacional de energía geotérmica, para generar confianza y atraer al sector privado, promoviendo una ruta clara para proyectos geotérmicos.
- Es importante que se realicen investigaciones más profundas en relación a las zonas geotermales y su aprovechamiento, para el presente trabajo se consideró un flujo másico promedio, sin embargo, en exploraciones podría determinarse un flujo de aprovechamiento más alto, lo que daría lugar a mayores potencias generadas.
- En la mayoría de las zonas geotermales con un alto grado energético, las comunidades locales ya han establecido fuentes geotermales principalmente utilizadas en recreación, por lo que, si se quiere promover los proyectos geotérmicos, se debería concientizar a las comunidades con los beneficios que traerían estos proyectos, como el empleo, desarrollo de infraestructuras (caminos, pistas, parques) y la generación de energía eléctrica para la comunidad.
- Es importante también que se forme a profesionales especializados sobre el tema, para un mejor desarrollo de los proyectos geotérmicos, esto lograría alcanzar una sostenibilidad a lo largo de los años.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AccuWeather. (2024). *Clima*.

<https://www.accuweather.com/es/pe/moquegua/258747/weather-forecast/258747>

Albuixech, M. (2017). *Desarrollo de un modelo de ciclo orgánico Rankine. Ejemplo de aplicación para análisis de fluidos de trabajo de bajo potencial de efecto invernadero*.

Barrón , A., Centurión ,M., Ferreyros , L., Forero , G., López , G., & Markovinovic , L. (2021). *La importancia del uso de energías renovables en centros comerciales en Lima*.

Bulnes , J. (2018). *Dimensionamiento y selección de una central geotérmica basada en el ciclo Rankine orgánico ubicada en el yacimiento geotérmico Jesús María - Moquegua*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Carl Roth. (2024). Ficha de datos de seguridad n- Hexano.
<https://www.carlroth.com/com/en/>

Chafloque , D., & Incio , M. (2022). *Analisis del potencial de generacion de energía electrica en Peru en Departamento de Lambayeque utilizando la cascara de arroz como combustible en un ciclo de rankine organico*.

Comisión para la operación ambiental. (2024). *Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en America del Norte*.
<http://www.cec.org/sites/default/napp/es/greenhouse-gases.php>

Dirección de geología ambiental y riesgo geológico. (2014). *Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua*.

Flores , F. (2016). *Estudio de optimización exergética y termodinámica de una central geotérmica en Pampa Apacheta*. Universidad de Chile.

Gas Meridional. (2020). *Comercialización del gas natural*.
<https://www.gasmeridional.com.ar/comercializacion-de-gas-natural/>

Guevara , R. (2020). *Generalidades de las centrales termoeléctricas*.

INGEMMET. (2019). *Caracterización de los sistemas geotermales asociados a los volcanes activos ubinas y huaynaputina, Region Moquegua*.

- Martin, A., Romy, R., Agustina, D., & Ibra, A. (2019). Diseño y fabricación de ciclo Rankine orgánico - sistema que utiliza fluido de trabajo r-134a con evaporador helicoidal y condensador. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 539(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/539/1/012027>
- Medina, D., & Guillen, E. (2018). *Diseño de una central geotérmica de 100 MW desde la generación de energía eléctrica hasta su transmisión a la subestación eléctrica Montalvo de la ciudad de Moquegua y aprovechamiento cogenerativo para desarrollo sostenible*. Universidad Católica de Santa María.
- Mendez, G. (2015). *Centrales térmicas de vapor ciclo de rankine*.
- Merck. (2024). Hexamethyldisiloxane. <https://www.sigmaaldrich.com/PE/es/product/aldrich/205389?srsId=AfmBOopykRVQqXE9trQJK2QkRgAyhLLOBTdSCndebyZWccItcEbNVnCW>
- OSINERGMIN. (2024). *Resolución De Consejo Directivo Organismo Supervisor De La Inversión En Energía Y Minería N° 051-2024-OS/CD*.
- Peralta, R., & Miranda, R. (2017). *Análisis de estudio de la energía geotérmica de las aguas termales de Putina empleando isobutano para la generación de energía eléctrica para la localidad de Putina*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Pinedo, C., & Ramirez, E. (2015). *Análisis y evaluación del potencial geotérmico para su aprovechamiento mediante una central de ciclo binario para generación de potencia eléctrica en la región Corongo -Ancash, Perú*. Universidad Nacional del Santa.
- Prada , A. , & Noriega , Y. (2022). *Estudio económico de la implementación del ciclo binario combinado para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de recursos geotérmicos en la zona de “Tufiño-chiles-cerro negro.”*
- Pulido , J. (2017). *Estudio y diseño preliminar de una planta de generación eléctrica a partir de energía geotérmica en la isla de Tenerife*. Universidad de la Laguna.
- Reguero , S. (2019). *Análisis energético, exergético y económico de una planta*

geotérmica de generación de energía eléctrica en España. Escuela técnica superior de ingenieros industriales.

Rupérez , R. (2017). *Estudio termoeconómico para la implantación de centrales geotérmicas de generación eléctrica operadas con Co2 supercrítico*. Universidad Carlos III de Madrid.

Secretaría de gobierno de energía. (2019). *Estado del Arte de la Tecnología de generación de energía eléctrica a partir de la geotermia*.

Servicio geológico colombiano. (2019). *¿Que es exploracion geotermica?*

Tranamil, Y. (2019). *Evaluación termodinámica y económica de la integración de un campo solar de concentración a una central geotérmica empleada en el norte de Chile*. Universidad de Chile.

Valencia, D. (2021). *Determinación del estado de equilibrio químico fluido-roca del yacimiento geotérmico Las Tres Vírgenes (BCS) a partir de la geotermometría de solutos y de SiO₂*.

Valverde, M. (2023). *Diseño y optimización de una central geotérmica de expansión flash*. Universidad Rey Juan Carlos.

Villarino , C. (2020). *Diseño de una central geotérmica de 60 MW usando el software C.O.C.O*. Universidad de Valladolid.

Viloche, J. (n.d.). *Foro Regional: “Gas Natural - Propiedades y Uso - Proyectos Presentes y Futuros.”*

World Bank Group. (n.d.). *Estado y tendencias del panel de fijación de precios del carbono*. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>

VII. ANEXOS

ANEXO 1: Balance energético en el Isopentano con temperaturas de separador T2 variables, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 120 °C

ANEXO 2: Balance energético en el Isopentano con temperaturas de separador T2 variables, Presión de escape P5 2.5 bar, temperatura Ty 120 °C

ANEXO 3: Balance energético en el Isopentano con temperaturas de separador T2 variables, Presión de escape P5 3.5 bar, temperatura Ty 120 °C

ANEXO 4: Balance energético en el n-Pentano con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 110 °C

ANEXO 5: Balance energético en el n-Hexano con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 110 °C

ANEXO 6: Balance energético en el Propano con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 90 °C

ANEXO 7: Balance energético en el Isobutano con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 120 °C

ANEXO 8: Balance energético en el R-123 con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 110 °C

ANEXO 9: Balance energético en el R-134A con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 100 °C

ANEXO 10: Balance energético en el R-245fa con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 130 °C

ANEXO 11: Balance energético en el MM con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 110 °C

ANEXO 12: Balance energético en el Amoniaco con temperatura de separador T2=170 °C, Presión de escape P5 1.5 bar, temperatura Ty 100 °C

ANEXO 13: Resumen de estados en el N-Pentano

ANEXO 14: Resumen de estados en el N-Hexano

ANEXO 15: Resumen de estados en el Propano

- ANEXO 16: Resumen de estados en el Isobutano
- ANEXO 17: Resumen de estados en el R123
- ANEXO 18: Resumen de estados en el R134A
- ANEXO 19: Resumen de estados en el R245fa
- ANEXO 20: Resumen de estados en el MM
- ANEXO 21: Resumen de estados en el Amoniaco
- ANEXO 22: Personal para operación y mantenimiento de central geotérmica
- ANEXO 23: Equipos típicos para la venta de energía en una central geotérmica
- ANEXO 24: Características de la turbina de vapor
- ANEXO 25: Características de la turbina CRO
- ANEXO 26: Características del generador
- ANEXO 27: Características de los intercambiadores de calor
- ANEXO 28: Características de las bombas (opción 1)
- ANEXO 29: Características de las bombas (opción 2)
- ANEXO 30: Característica de los motores marca SEW
- ANEXO 31: Característica de los acoples
- ANEXO 32: Esquema general de una central flash binaria integrada con Isopentano
- ANEXO 33: Evaluación económica al 6% de tasa de interés

ANEXOS

Anexo 1.

Balance energético en el Isopentano con temperaturas de separador T_2 variables, Presión de escape P_5 1.5 bar, temperatura T_y 120 °C

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POT TOTAL [MW]	POT NETA [MW]	POT EFECT. [MW]	POT. TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.536	0.1253	57.768	25.671	1.132	0.049	15.848	7.361	5.709	5.535	4.981	12.068	73.615	33.032	47881.986	45.863%	16.756%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.223	0.1142	52.659	23.401	1.417	0.061	19.832	9.211	6.080	5.904	5.314	12.068	72.491	32.612	44200.019	48.925%	18.104%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.919	0.1034	47.684	21.190	1.715	0.074	24.001	11.148	6.369	6.192	5.573	12.068	71.686	32.338	41679.576	51.307%	19.147%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.611	0.0925	42.660	18.958	2.027	0.088	28.374	13.179	6.567	6.386	5.748	12.068	71.034	32.137	40042.229	52.920%	19.873%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.294	0.0813	37.483	16.657	2.355	0.102	32.964	15.311	6.739	6.555	5.900	12.068	70.447	31.968	38686.566	54.321%	20.507%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	1.994	0.0706	32.569	14.473	2.699	0.117	37.786	17.550	6.714	6.527	5.874	12.068	70.355	32.024	38807.357	54.081%	20.380%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.681	0.0595	27.469	12.207	3.062	0.133	42.861	19.908	6.669	6.477	5.829	12.068	70.330	32.115	39090.895	53.670%	20.168%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.363	0.0483	22.262	9.893	3.445	0.149	48.227	22.400	6.542	6.344	5.710	12.068	70.489	32.293	39999.100	52.570%	19.646%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.040	0.0368	16.988	7.549	3.849	0.167	53.877	25.024	6.332	6.128	5.515	12.068	70.865	32.573	41631.035	50.779%	18.813%

Anexo 2.

Balance energético en el Isopentano con temperaturas de separador T_2 variables, Presión de escape P_5 2.5 bar, temperatura T_y 120 °C

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POT TOTAL [MW]	POT NETA [MW]	POT EFECT. [MW]	POT. TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	0.146	4.088	0.189	57.221	26.564	1.133	0.052	15.855	7.361	5.367	5.126	4.614	12.068	73.077	33.925	51319.889	42.478%	15.110%
140	3.614	10.459	39.541	0.623	3.730	0.172	52.211	24.238	1.417	0.065	19.837	9.209	5.770	5.532	4.979	12.068	72.048	33.447	46883.115	45.843%	16.540%
150	4.760	9.594	40.407	0.998	3.374	0.156	47.226	21.924	1.716	0.079	24.014	11.148	6.087	5.852	5.267	12.068	71.240	33.072	43823.675	48.493%	17.695%
160	6.181	8.699	41.301	1.270	3.018	0.139	42.248	19.613	2.028	0.094	28.389	13.179	6.316	6.083	5.475	12.068	70.637	32.792	41802.767	50.407%	18.550%
170	7.920	7.775	42.225	1.530	2.649	0.122	37.084	17.216	2.356	0.109	32.980	15.311	6.535	6.304	5.674	12.068	70.064	32.527	40010.632	52.238%	19.381%
180	10.027	6.818	43.183	1.522	2.305	0.106	32.262	14.977	2.701	0.125	37.802	17.549	6.528	6.297	5.667	12.068	70.064	32.527	40057.115	52.178%	19.359%
190	12.551	5.820	44.180	1.506	1.943	0.090	27.198	12.626	3.064	0.141	42.882	19.908	6.512	6.281	5.653	12.068	70.080	32.534	40164.762	52.049%	19.307%
200	15.549	4.775	45.225	1.395	1.574	0.073	22.038	10.231	3.447	0.159	48.251	22.400	6.417	6.185	5.567	12.068	70.288	32.631	40910.874	51.252%	18.955%
210	19.077	3.684	46.316	1.184	1.201	0.055	16.813	7.805	3.851	0.178	53.904	25.025	6.236	6.003	5.403	12.068	70.717	32.830	42407.645	49.745%	18.286%

Anexo 3.

Balance energético en el Isopentano con temperaturas de separador T_2 variables, Presión de escape P_5 3.5 bar, temperatura T_y 120 °C

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS									
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POT TOTAL [MW]	POT NETA [MW]	POT EFECT. [MW]	POT. TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)	
130	2.701																					
140	3.614	10.459	39.541	0.056	4.135	0.224	51.472	24.805	1.4172	0.0654	19.8370	9.2091	5.608	5.319	4.787	12.068	71.309	34.014	48260.983	44.077%	15.638%	
150	4.760	9.594	40.407	0.486	3.740	0.202	46.556	22.436	1.7156	0.0792	24.0138	11.1482	5.942	5.660	5.094	12.068	70.569	33.584	44883.556	46.903%	16.854%	
160	6.181	8.699	41.301	0.814	3.346	0.181	41.645	20.069	2.0281	0.0936	28.3887	13.1791	6.187	5.913	5.322	12.068	70.033	33.248	42639.654	48.996%	17.784%	
170	7.920	7.775	42.225	1.044	2.951	0.160	36.732	17.702	2.3562	0.1088	32.9804	15.3108	6.351	6.082	5.474	12.068	69.713	33.013	41261.075	50.401%	18.424%	
180	10.027	6.818	43.183	1.177	2.554	0.138	31.796	15.323	2.7007	0.1247	37.8024	17.5494	6.432	6.169	5.552	12.068	69.599	32.873	40616.311	51.117%	18.766%	
190	12.551	5.820	44.180	1.215	2.153	0.116	26.803	12.917	3.0636	0.1415	42.8820	19.9075	6.432	6.174	5.557	12.068	69.685	32.824	40630.880	51.162%	18.810%	
200	15.549	4.775	45.225	1.160	1.745	0.094	21.718	10.466	3.4471	0.1592	48.2508	22.3999	6.352	6.098	5.488	12.068	69.969	32.866	41304.963	50.532%	18.555%	
210	19.077	3.684	46.316	1.006	1.331	0.072	16.566	7.983	3.8510	0.1778	53.9044	25.0245	6.188	5.938	5.344	12.068	70.470	33.008	42723.744	49.205%	17.990%	

Anexo 4.

Balance energético en el n-Pentano con temperatura de separador $T_2=170$ °C, Presión de escape P_5 1.5 bar, temperatura T_y 110 °C

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.546	0.109	54.674	25.671	1.054	0.034	15.477	7.361	5.641	5.498	4.948	12.068	70.150	33.032	45932.576	45.559%	16.645%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.232	0.099	49.839	23.401	1.319	0.043	19.367	9.211	5.991	5.849	5.264	12.068	69.206	32.612	42592.592	48.471%	17.936%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.927	0.090	45.131	21.190	1.597	0.052	23.439	11.148	6.259	6.118	5.506	12.068	68.570	32.338	40347.603	50.697%	18.919%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.619	0.080	40.376	18.958	1.888	0.061	27.710	13.179	6.434	6.293	5.664	12.068	68.085	32.137	38948.436	52.147%	19.582%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.301	0.071	35.475	16.657	2.193	0.071	32.192	15.311	6.583	6.442	5.797	12.068	67.668	31.968	37816.802	53.378%	20.151%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	1.999	0.061	30.825	14.473	2.514	0.081	36.901	17.550	6.534	6.391	5.752	12.068	67.726	32.024	38147.273	52.961%	19.958%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.686	0.052	25.998	12.207	2.851	0.092	41.857	19.908	6.463	6.319	5.687	12.068	67.856	32.115	38656.808	52.363%	19.677%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.366	0.042	21.070	9.893	3.208	0.104	47.098	22.400	6.308	6.163	5.547	12.068	68.168	32.293	39819.633	51.068%	19.084%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.043	0.032	16.079	7.549	3.584	0.116	52.615	25.024	6.070	5.922	5.330	12.068	68.694	32.573	41759.963	49.071%	18.180%

Anexo 5.

Balance energético en el n-Hexano con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape $P_5\ 1.5\ \text{bar}$, temperatura $T_y\ 110\text{ }^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.508	0.043	53.552	25.671	1.042	0.014	15.135	7.361	5.591	5.534	4.980	12.068	68.687	33.032	44685.191	45.854%	16.752%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.198	0.039	48.816	23.401	1.304	0.017	18.939	9.211	5.941	5.885	5.296	12.068	67.756	32.612	41450.838	48.762%	18.044%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.895	0.036	44.205	21.190	1.578	0.021	22.921	11.148	6.209	6.153	5.538	12.068	67.126	32.338	39274.014	50.986%	19.027%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.590	0.032	39.547	18.958	1.865	0.024	27.097	13.179	6.384	6.328	5.695	12.068	66.645	32.137	37915.104	52.435%	19.691%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.276	0.028	34.748	16.657	2.167	0.028	31.481	15.311	6.533	6.476	5.829	12.068	66.229	31.968	36814.836	53.665%	20.259%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	1.978	0.024	30.192	14.473	2.484	0.032	36.086	17.550	6.483	6.426	5.783	12.068	66.278	32.024	37130.218	53.249%	20.067%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.668	0.021	25.465	12.207	2.818	0.037	40.933	19.908	6.411	6.354	5.719	12.068	66.398	32.115	37618.594	52.652%	19.786%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.352	0.017	20.638	9.893	3.171	0.041	46.057	22.400	6.256	6.198	5.578	12.068	66.695	32.293	38738.629	51.359%	19.193%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.032	0.013	15.749	7.549	3.542	0.046	51.453	25.024	6.016	5.957	5.362	12.068	67.201	32.573	40609.557	49.365%	18.289%

Anexo 6.

Balance energético en el Propano con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape $P_5\ 1.5\ \text{bar}$, temperatura $T_y\ 90\text{ }^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.395	0.902	77.812	25.671	0.973	0.256	22.304	7.361	5.409	4.251	3.826	12.068	100.116	33.032	84791.047	35.222%	12.868%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.095	0.823	70.931	23.401	1.218	0.324	27.920	9.211	5.753	4.607	4.146	12.068	98.851	32.612	77250.650	38.172%	14.125%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.803	0.745	64.230	21.190	1.474	0.392	33.790	11.148	6.013	4.876	4.389	12.068	98.020	32.338	72365.751	40.406%	15.079%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.507	0.666	57.463	18.958	1.743	0.459	39.934	13.179	6.178	5.053	4.548	12.068	97.396	32.137	69392.462	41.869%	15.723%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.203	0.586	50.488	16.657	2.025	0.538	46.408	15.311	6.318	5.194	4.674	12.068	96.897	31.968	67163.124	43.037%	16.247%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	1.914	0.509	43.870	14.473	2.321	0.617	53.197	17.550	6.257	5.131	4.618	12.068	97.067	32.024	68105.891	42.516%	16.022%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.615	0.429	37.001	12.207	2.633	0.700	60.342	19.908	6.173	5.044	4.540	12.068	97.342	32.115	69472.458	41.798%	15.707%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.308	0.348	29.987	9.893	2.963	0.787	67.896	22.400	6.005	4.870	4.383	12.068	97.883	32.293	72363.668	40.351%	15.079%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	0.998	0.265	22.883	7.549	3.310	0.880	75.850	25.024	5.751	4.606	4.145	12.068	98.733	32.573	77171.261	38.166%	14.140%

Anexo 7.

Balance energético en el Isobutano con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape P_5 1.5 bar, temperatura T_y 120 $^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.597	0.443	65.631	25.671	1.144	0.171	18.697	7.361	5.782	5.168	4.651	12.068	84.328	33.032	58741.617	42.825%	15.646%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.279	0.404	59.827	23.401	1.432	0.214	23.398	9.211	6.151	5.533	4.979	12.068	83.225	32.612	54152.706	45.846%	16.965%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.969	0.366	54.175	21.190	1.733	0.259	28.317	11.148	6.438	5.813	5.232	12.068	82.492	32.338	51083.996	48.172%	17.977%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.656	0.327	48.467	18.958	2.049	0.306	33.476	13.179	6.634	6.000	5.400	12.068	81.943	32.137	49165.344	49.719%	18.671%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.334	0.288	42.585	16.657	2.380	0.356	38.892	15.311	6.804	6.160	5.544	12.068	81.476	31.968	47612.801	51.048%	19.271%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	2.028	0.250	37.002	14.473	2.728	0.408	44.580	17.550	6.777	6.120	5.508	12.068	81.583	32.024	47990.282	50.712%	19.111%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.711	0.211	31.209	12.207	3.095	0.462	50.568	19.908	6.731	6.058	5.452	12.068	81.777	32.115	48598.153	50.197%	18.863%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.386	0.171	25.292	9.893	3.482	0.520	56.899	22.400	6.602	5.911	5.320	12.068	82.191	32.293	50056.794	48.981%	18.305%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.058	0.130	19.301	7.549	3.890	0.581	63.564	25.024	6.391	5.679	5.111	12.068	82.865	32.573	52527.670	47.060%	17.435%

Anexo 8.

Balance energético en el R-123 con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape P_5 1.5 bar, temperatura T_y 110 $^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.684	0.170	123.586	25.671	1.093	0.052	35.097	7.361	5.818	5.596	5.036	12.068	158.683	33.032	102088.473	46.368%	16.940%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.359	0.155	112.657	23.401	1.368	0.066	43.920	9.211	6.166	5.945	5.351	12.068	156.577	32.612	94809.818	49.265%	18.230%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	3.041	0.140	102.014	21.190	1.655	0.079	53.154	11.148	6.433	6.213	5.591	12.068	155.168	32.338	89912.926	51.481%	19.212%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.721	0.126	91.266	18.958	1.957	0.094	62.838	13.179	6.606	6.387	5.748	12.068	154.104	32.137	86864.929	52.922%	19.873%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.391	0.110	80.189	16.657	2.274	0.109	73.004	15.311	6.754	6.534	5.881	12.068	153.193	31.968	84401.558	54.145%	20.440%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	2.077	0.096	69.677	14.473	2.606	0.125	83.683	17.550	6.705	6.484	5.835	12.068	153.359	32.024	85153.546	53.725%	20.246%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.752	0.081	58.767	12.207	2.956	0.142	94.922	19.908	6.634	6.411	5.770	12.068	153.689	32.115	86300.992	53.124%	19.963%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.420	0.066	47.627	9.893	3.326	0.160	106.806	22.400	6.480	6.255	5.629	12.068	154.432	32.293	88886.881	51.828%	19.369%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.084	0.050	36.344	7.549	3.716	0.178	119.318	25.024	6.242	6.014	5.412	12.068	155.662	32.573	93181.829	49.833%	18.462%

Anexo 9.

Balance energético en el R-134A con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape $P_5\ 1.5\ \text{bar}$, temperatura $T_y\ 100\text{ }^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.566	0.908	158.519	25.671	1.023	0.260	45.452	7.361	5.630	4.461	4.015	12.068	203.971	33.032	164588.507	36.969%	13.506%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.251	0.828	144.500	23.401	1.280	0.326	56.879	9.211	5.970	4.817	4.335	12.068	201.379	32.612	150509.546	39.913%	14.770%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.944	0.750	130.850	21.190	1.549	0.394	68.837	11.148	6.228	5.085	4.576	12.068	199.686	32.338	141382.210	42.133%	15.723%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.634	0.671	117.063	18.958	1.831	0.466	81.379	13.179	6.393	5.256	4.731	12.068	198.442	32.137	135915.788	43.554%	16.356%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.314	0.589	102.855	16.657	2.127	0.542	94.544	15.311	6.531	5.400	4.860	12.068	197.399	31.968	131605.503	44.744%	16.891%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	2.011	0.512	89.372	14.473	2.438	0.621	108.373	17.550	6.470	5.337	4.803	12.068	197.745	32.024	133381.422	44.226%	16.666%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.696	0.432	75.378	12.207	2.766	0.704	122.928	19.908	6.387	5.251	4.726	12.068	198.306	32.115	135952.295	43.513%	16.351%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.374	0.350	61.089	9.893	3.112	0.792	138.319	22.400	6.220	5.078	4.570	12.068	199.408	32.293	141378.306	42.075%	15.724%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.049	0.267	46.617	7.549	3.476	0.885	154.522	25.024	5.968	4.816	4.334	12.068	201.140	32.573	150361.612	39.905%	14.784%

Anexo 10.

Balance energético en el R-245fa con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape $P_5\ 1.5\ \text{bar}$, temperatura $T_y\ 130\text{ }^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN TOTAL [MW]	POTEN NETA [MW]	POTEN EFECT. [MW]	POTEN TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.553	0.222	111.753	25.671	1.215	0.105	30.842	7.361	5.809	5.482	4.934	12.068	142.595	33.032	93633.912	45.430%	16.597%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.239	0.202	101.870	23.401	1.521	0.132	38.596	9.211	6.199	5.866	5.279	12.068	140.466	32.612	86210.371	48.605%	17.986%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.933	0.183	92.247	21.190	1.840	0.160	46.710	11.148	6.509	6.167	5.550	12.068	138.957	32.338	81116.870	51.102%	19.070%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.624	0.164	82.528	18.958	2.176	0.189	55.220	13.179	6.728	6.376	5.738	12.068	137.748	32.137	77776.655	52.833%	19.840%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.306	0.144	72.511	16.657	2.528	0.219	64.153	15.311	6.923	6.560	5.904	12.068	136.665	31.968	75001.164	54.357%	20.520%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	2.003	0.125	63.006	14.473	2.897	0.251	73.537	17.550	6.922	6.546	5.891	12.068	136.543	32.024	75095.415	54.240%	20.440%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.690	0.105	53.140	12.207	3.287	0.285	83.414	19.908	6.902	6.512	5.860	12.068	136.554	32.115	75495.783	53.957%	20.276%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.369	0.085	43.067	9.893	3.698	0.321	93.857	22.400	6.801	6.395	5.756	12.068	136.924	32.293	77078.934	52.992%	19.803%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.045	0.065	32.864	7.549	4.131	0.358	104.852	25.024	6.619	6.196	5.576	12.068	137.717	32.573	80020.760	51.340%	19.021%

Anexo 11.

Balance energético en el MM con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape $P_5\ 1.5\ \text{bar}$, temperatura $T_y\ 110\text{ }^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN. TOTAL [MW]	POTEN. NETA [MW]	POTEN. EFECT. [MW]	POTEN. TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.194	0.046	77.049	25.671	0.940	0.014	21.685	7.361	5.175	5.114	4.603	12.068	98.733	33.032	69498.977	42.38%	15.48%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	2.911	0.042	70.235	23.401	1.176	0.017	27.136	9.211	5.527	5.468	4.921	12.068	97.371	32.612	64111.477	45.31%	16.77%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	2.636	0.038	63.600	21.190	1.424	0.021	32.841	11.148	5.796	5.736	5.163	12.068	96.441	32.338	60523.109	47.53%	17.74%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.358	0.034	56.899	18.958	1.683	0.025	38.825	13.179	5.970	5.911	5.320	12.068	95.724	32.137	58302.261	48.98%	18.39%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.072	0.030	49.993	16.657	1.955	0.029	45.106	15.311	6.117	6.058	5.452	12.068	95.099	31.968	56513.744	50.20%	18.95%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	1.801	0.026	43.440	14.473	2.241	0.033	51.704	17.550	6.063	6.004	5.403	12.068	95.143	32.024	57051.335	49.75%	18.75%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.519	0.022	36.638	12.207	2.542	0.038	58.648	19.908	5.987	5.927	5.334	12.068	95.286	32.115	57876.674	49.11%	18.46%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.231	0.018	29.693	9.893	2.861	0.042	65.990	22.400	5.825	5.765	5.188	12.068	95.683	32.293	59752.096	47.77%	17.85%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	0.939	0.014	22.659	7.549	3.196	0.047	73.721	25.024	5.578	5.517	4.965	12.068	96.380	32.573	62894.103	45.71%	16.94%

Anexo 12.

Balance energético en el Amoniaco con temperatura de separador $T_2=170\text{ }^\circ\text{C}$, Presión de escape $P_5\ 1.5\ \text{bar}$, temperatura $T_y\ 100\text{ }^\circ\text{C}$

T2 [C]	P2 [bar]	FLASH			LOOP 1				LOOP 2				RESULTADOS								
		m4 VAPOR [kg/s]	m3 LIQUIDO [kg/s]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC1 [kg/s]	Q SUM. LOOP 1 [MW]	POTEN. GENER. [MW]	POTEN. CONSU [MW]	mORC2 [kg/s]	Q SUM. LOOP 2 [MW]	POTEN. TOTAL [MW]	POTEN. NETA [MW]	POTEN. EFECT. [MW]	POTEN. TEORICA [MW]	mORC TOTAL [kg/s]	Q SUM. TOTAL [MW]	CONSU. ESPECIF. [kg/MWh]	EFICIE. UTILZ. (%)	EFICIE. TERMICA (%)
130	2.701	11.300	38.700	1.041	3.903	0.501	24.882	25.671	1.053	0.122	6.989	7.361	5.996	5.373	4.836	12.068	31.871	33.032	21353.506	44.524%	16.267%
140	3.614	10.450	39.550	1.440	3.557	0.457	22.681	23.401	1.317	0.152	8.747	9.211	6.314	5.705	5.135	12.068	31.428	32.612	19830.955	47.276%	17.494%
150	4.760	9.595	40.405	1.736	3.221	0.414	20.539	21.190	1.594	0.184	10.585	11.148	6.551	5.954	5.358	12.068	31.124	32.338	18820.209	49.333%	18.410%
160	6.181	8.700	41.300	1.928	2.882	0.370	18.375	18.958	1.885	0.218	12.514	13.179	6.695	6.107	5.496	12.068	30.889	32.137	18208.453	50.605%	19.003%
170	7.920	7.775	42.225	2.089	2.532	0.325	16.145	16.657	2.189	0.253	14.538	15.311	6.811	6.233	5.610	12.068	30.683	31.968	17721.815	51.648%	19.498%
180	10.027	6.815	43.185	2.021	2.200	0.283	14.028	14.473	2.510	0.290	16.665	17.550	6.731	6.159	5.543	12.068	30.693	32.024	17941.867	51.032%	19.231%
190	12.551	5.820	44.180	1.926	1.856	0.238	11.832	12.207	2.847	0.329	18.903	19.908	6.628	6.061	5.455	12.068	30.735	32.115	18255.552	50.223%	18.873%
200	15.549	4.775	45.225	1.734	1.504	0.193	9.589	9.893	3.203	0.370	21.270	22.400	6.441	5.878	5.290	12.068	30.859	32.293	18900.724	48.704%	18.201%
210	19.077	3.685	46.315	1.443	1.148	0.147	7.317	7.549	3.578	0.413	23.762	25.024	6.169	5.608	5.047	12.068	31.079	32.573	19950.520	46.471%	17.217%

Anexo 13.

Resumen de estados en el N-Pentano

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	119.54	n.a	42.225	502.24	1.522
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	6.743	106.00	1	35.48	492.83	1.3620
bi	0.984	57.77	n.a	35.48	420.77	1.3620
br	0.984	61.66	n.a	35.48	427.98	1.3840
c	0.984	35.00	0	35.48	21.31	0.0711
di	6.743	35.20	n.a	35.48	22.51	0.0711
dr	6.743	35.65	n.a	35.48	23.29	0.0745
e	6.743	106.00	0	35.48	203.42	0.5985
LOOP BINARIO 2						
u	7.349	110.00	1	32.19	499.11	1.3700
vi	0.984	59.20	n.a	32.19	423.43	1.3700
vr	0.984	63.28	n.a	32.19	430.99	1.3930
w	0.984	35.00	0	32.19	21.31	0.0711
xi	7.349	35.23	n.a	32.19	22.35	0.0711
xr	7.349	35.72	n.a	32.19	23.51	0.0756
y	7.349	110.00	0	32.19	214.66	0.6277

Anexo 14.

Resumen de estados en el N-Hexano

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	117.69	n.a	42.225	494.41	1.4890
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	2.79	106.00	1	34.75	498.68	1.3770
bi	0.31	62.25	n.a	34.75	425.91	1.3770
br	0.31	66.19	n.a	34.75	433.18	1.3990
c	0.31	35.00	0	34.75	18.51	0.0611
di	2.79	35.07	n.a	34.75	18.89	0.0611
dr	2.79	35.26	n.a	34.75	19.32	0.0625
e	2.79	106.00	0	34.75	193.73	0.5707
LOOP BINARIO 2						
u	3.08	110.00	1	31.48	505.76	1.3870
vi	0.31	64.07	n.a	31.48	429.27	1.3870
vr	0.31	68.21	n.a	31.48	436.92	1.4100
w	0.31	35.00	0	31.48	18.51	0.0611
xi	3.08	35.08	n.a	31.48	18.94	0.0611
xr	3.08	35.29	n.a	31.48	19.41	0.0623
y	3.08	110	0	31.48	204.39	0.5982

Anexo 15.

Resumen de estados en el Propano

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	126.81	n.a	42.225	533.16	1.6000
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	37.65	90.00	1	50.49	618.07	2.2320
bi	10.53	29.01	n.a	50.49	569.59	2.2320
br	10.53	29.01	n.a	50.49	574.44	2.2480
c	10.53	29.00	0	50.49	276.56	1.2620
di	37.65	31.03	n.a	50.49	282.06	1.2620
dr	37.65	33.26	n.a	50.49	288.16	1.2820
e	37.65	90.00	0	50.49	484.89	1.8650
LOOP BINARIO 2						
u	37.65	90.00	1	46.41	618.07	2.2320
vi	10.53	29.01	n.a	46.41	569.59	2.2320
vr	10.53	29.01	n.a	46.41	574.44	2.2480
w	10.53	29.00	0	46.41	276.56	1.2620
xi	37.65	31.03	n.a	46.41	282.05	1.2620
xr	37.65	33.26	n.a	46.41	288.16	1.282
y	37.65	90.00	0	46.41	448.89	1.865

Anexo 16.

Resumen de estados en el Isobutano

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	138.00	n.a	42.225	580.97	1.7918
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	22.16	106.00	1	42.58	682.20	2.3810
bi	4.65	45.24	n.a	42.58	621.30	2.3810
br	4.65	48.41	n.a	42.58	627.39	2.4000
c	4.65	35.00	0	42.58	284.30	1.2880
di	22.16	35.96	n.a	42.58	287.50	1.2880
dr	22.16	37.38	n.a	42.58	291.06	1.3000
e	22.16	106.00	0	42.58	486.40	1.8650
LOOP BINARIO 2						
u	28.38	120.00	1	38.89	687.12	2.3740
vi	4.65	44.08	n.a	38.89	619.12	2.3740
vr	4.65	47.64	n.a	38.89	625.92	2.3950
w	4.65	35.00	0	38.89	284.30	1.2880
xi	28.38	36.30	n.a	38.89	288.63	1.2880
xr	28.38	38.22	n.a	38.89	293.44	1.3030
y	28.38	120.00	0	38.89	537.15	1.9920

Anexo 17.

Resumen de estados en el R123

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	118.78	n.a	42.225	499.01	1.5140
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	8.98	106.00	1	80.19	445.71	1.6960
bi	1.31	46.59	n.a	80.19	412.59	1.6960
br	1.31	51.06	n.a	80.19	415.90	1.7060
c	1.31	35.00	0	80.19	236.62	1.1260
di	8.98	35.40	n.a	80.19	237.27	1.1260
dr	8.98	36.09	n.a	80.19	237.99	1.1280
e	8.98	106.00	0	80.19	315.74	1.3530
LOOP BINARIO 2						
u	9.78	110.00	1	73.00	447.84	1.6980
vi	1.31	47.46	n.a	73.00	413.231	1.6980
vr	1.31	52.12	n.a	73.00	416.69	1.7090
w	1.31	35.00	0	73.00	236.62	1.1260
xi	9.78	35.43	n.a	73.00	237.32	1.1260
xr	9.78	36.18	n.a	73.00	238.11	1.1290
y	9.78	110.00	0	73.00	320.54	1.3660

Anexo 18.

Resumen de estados en el R134A

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	152.64	n.a	42.225	643.91	1.8690
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	39.75	100.00	1	102.86	258.37	0.8122
bi	7.27	28.00	n.a	102.86	233.37	0.8122
br	7.27	28.00	n.a	102.86	235.87	0.8205
c	7.27	28.00	0	102.86	90.70	0.3385
di	39.75	29.84	n.a	102.86	93.41	0.3385
dr	39.75	31.97	n.a	102.86	96.42	0.3484
e	39.75	100.00	0	102.86	224.79	0.7222
LOOP BINARIO 2						
u	39.75	100.00	1	94.54	258.37	0.8122
vi	7.27	28.00	n.a	94.54	233.37	0.8122
vr	7.27	28.00	n.a	94.54	235.87	0.8205
w	7.27	28.00	0	94.54	90.70	0.3385
xi	39.75	29.84	n.a	94.54	93.41	0.3385
xr	39.75	31.97	n.a	94.54	96.42	0.3484
y	39.75	100.00	0	94.54	224.79	0.7222

Anexo 19.

Resumen de estados en el R245fa

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.92	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.92	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.92	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.50	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.50	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.50	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.50	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.92	135.67	n.a	42.225	570.99	1.6940
9	7.92	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	14.46	106.00	1	72.51	477.50	1.7940
bi	2.11	47.24	n.a	72.51	442.18	1.7940
br	2.11	50.83	n.a	72.51	445.71	1.8050
c	2.11	35.00	0	72.51	245.81	1.1573
di	14.46	35.46	n.a	72.51	246.75	1.1573
dr	14.46	36.24	n.a	72.51	247.79	1.6100
e	14.46	106.00	0	72.51	349.34	1.1456
LOOP BINARIO 2						
u	23.39	130.00	1	64.15	487.88	1.8000
vi	2.11	49.20	n.a	64.15	444.10	1.8000
vr	2.11	53.65	n.a	64.15	448.48	1.8130
w	2.11	35.00	0	64.15	245.81	1.1573
xi	23.39	35.79	n.a	64.15	247.43	1.1573
xr	23.39	37.13	n.a	64.15	249.22	1.1630
y	23.39	130	0	64.15	390.40	1.5580

Anexo 20.

Resumen de estados en el MM

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.920	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.920	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.920	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.500	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.500	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.500	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.500	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.920	123.32	n.a	42.225	518.29	1.5630
9	7.920	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	1.197	106.00	1	49.99	599.88	2.15
bi	0.094	74.92	n.a	49.99	553.82	2.15
br	0.094	77.76	n.a	49.99	558.43	2.16
c	0.094	35.00	0	49.99	266.10	1.23
di	1.197	35.10	n.a	49.99	266.38	1.23
dr	1.197	35.27	n.a	49.99	266.70	1.23
e	1.197	106.00	0	49.99	409.69	1.65
LOOP BINARIO 2						
u	1.339	110.00	1	45.11	606.18	2.16
vi	0.094	77.50	n.a	45.11	558.01	2.16
vr	0.094	80.45	n.a	45.11	562.83	2.17
w	0.094	35.00	0	45.11	266.10	1.23
xi	1.339	35.11	n.a	45.11	266.40	1.23
xr	1.339	35.28	n.a	45.11	266.74	1.23
y	1.339	110.00	0	45.11	418.20	1.67

Anexo 21.

Resumen de estados en el Amoniaco

ESTADOS	P (BAR)	T (°C)	X	m (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg.°C)
1	33.48	240.00	0	50.00	1037.60	2.7020
2	7.920	170.00	0.155	50.00	1037.60	2.7602
3	7.920	170.00	0	42.225	719.10	2.0416
4	7.920	170.00	1	7.775	2767.10	6.6630
5i	1.500	111.37	0.903	7.775	2468.50	6.6630
5r	1.500	111.40	0.912	7.775	2498.36	6.7160
6	1.500	111.40	0	7.775	467.20	1.4339
7	1.500	85.00	n.a	7.775	356.00	1.1342
8	7.920	112.57	n.a	42.225	472.70	1.4460
9	7.920	85.00	n.a	42.225	356.50	1.1338
LOOP BINARIO 1						
a	70.289	106.00	1	16.14	1417.86	4.4140
bi	13.508	35.03	n.a	16.14	1243.59	4.4140
br	13.508	35.03	n.a	16.14	1261.02	4.4710
c	13.508	35.00	0	16.14	365.98	1.5660
di	70.289	36.61	n.a	16.14	375.52	1.5660
dr	70.289	38.81	n.a	16.14	386.13	1.6000
e	70.289	106.00	0	16.14	760.98	2.681
LOOP BINARIO 2						
u	62.571	100.00	1	14.54	1436.49	4.4970
vi	13.508	35.03	n.a	14.54	1269.17	4.4970
vr	13.508	35.03	n.a	14.54	1285.90	4.5510
w	13.508	35.00	0	14.54	365.98	1.5660
xi	62.571	36.39	n.a	14.54	374.22	1.5660
xr	62.571	38.29	n.a	14.54	383.37	1.5950
y	62.571	100.00	0	14.54	720.86	2.5790

Anexo 22.

Personal para operación y mantenimiento de central geotérmica

PERSONAL DE PLANTA			
PUESTO	CANTIDAD	SUELDO (USD/MES)	SUELDO (USD/AÑO)
GERENTE GENERAL	1	3,000.00	36,000.00
GERENTE DE PRODUCCION	1	2,210.00	26,520.00
JEFE DE MANTENIMIENTO	1	910.00	10,920.00
ASISTENTE DE MANTENIMIENTO	1	600.00	7,200.00
MECANICO SENIOR	5	700.00	42,000.00
ELECTRICISTA SENIOR	5	700.00	42,000.00
JEFE DE PRODUCCION	1	800.00	9,600.00
JEFE TURNO DIA	1	700.00	8,400.00
JEFE TURNO NOCHE	1	700.00	8,400.00
JEFE DE SEGURIDAD OCUPACIONAL	1	800.00	9,600.00
ASISTENTE DE SEGURIDAD OCUPACIONAL	1	500.00	6,000.00
OPERADOR TURNO DIA	12	650.00	93,600.00
OPERADOR TURNO NOCHE	12	650.00	93,600.00
PERSONAL DE SEGURIDAD	4	401.00	19,248.00
TOTAL	47	13,321.00	413,088.00

Anexo 23

Equipos típicos para la venta de energía en una central geotérmica

SUBESTACION Y TRANSFORMADOR			
DETALLE	CANTIDAD	MONTO UNITARIO (USD)	MONTO TOTAL (USD)
TRANSFORMADOR DE POTENCIA 138KV	1	436,505	436,505
INTERRUPTOR DE 138KV	1	43,109	43,109
SECCIONADOR DE LINEA 138KV	1	14,075	14,075
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 138KV	3	7,758	23,274
TRANSFORMADOR DE TENSION CAPACITVO 138KV	3	10,005	30,015
PARARRAYOS	3	2,834	8,502
TOTAL			555,478

Anexo 24.

Características de la turbina de vapor

TURBINA TM 10000



La línea TM, son turbinas de contrapresión, que poseen una regulación controlada de vapor y múltiples etapas, con el fin de poder soportar accionamientos con un alto nivel de rendimiento, que estén sometidos a diferentes parámetros de presión y temperaturas de vapor.

DATOS TECNICOS

- Potencia de salida hasta 20 MW
 - Presión de admisión hasta 45 bar
 - Temperatura de hasta 450 °C
-

CARACTERISTICAS PRINCIPALES

SISTEMA HIDRAULICO

- Calidad de aceite: ISO VG 68
 - Presión del aceite de lubricación: 10 bar g
 - Presión de aceite en los cojinetes:
 - ❖ Turbina: 1,2-1,8 bar g
 - ❖ Reductor: 1,2-1,8 bar g
 - Temperatura de aceite: 45 ± 2 °C
 - Temperatura de aceite en los cojinetes: 55 – 70 °C
 - Temperatura de metal antifricción: 70 – 95 °C
-
- Modelo: RTS 500
 - Maquina accionada por generador
-

REDUCTOR	<ul style="list-style-type: none"> • Rotación entrada: 8.000 rpm • Rotación salida: 1.800 rpm • Relación de transmisión - 4,44:1 • Caudal de aceite: 376 l/min • Factor de servicio: 1,3
ACOPLAMIENTO ALTA ROTACION	<ul style="list-style-type: none"> • Tip: Láminas • Rotación: 8.000 rpm • Lubricación: libre • Factor de servicio: 1,87
ACOPLAMIENTO BAJA ROTACION	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Engranaje • Rotación: 1.800 rpm • Lubricación: grasa • Factor de servicio: 1,5
BOMBA ACEITE PRINCIPAL	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: LN 82/140 • Accionamiento: Eje - baja reductor de velocidad • Presión de operación 10,0 kgf/cm² • Rotación 1.800 rpm • Flujo 46,23 m³/h
BOMBA ACEITE AXILIAR	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: LN 82/140 • Presión de operación: 10,0 kgf/cm² • Accionamiento: Motor eléctrico • Frecuencia: 60 Hz • Rotación: 1.750 rpm • Clase de protección: IP 55 • Flujo: 44,71 m³/h
BOMBA DE ACEITE DE EMERGENCIA	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Engranaje • Aceite: ISO VG 68 • Accionamiento: Motor eléctrico (125 VCC / 5,7 kW) • Flujo: 10,4 m³/h
	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción: Doble / casco-tubos vertical • Área de cambio: 40 m² • Capacidad de cambio: 190.357 kcal/h • Casco: Aceite

INTERCAMBIADOR DE CALOR	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo: 33,3 m³/h • Presión de operación (g): 10 bar g • Presión de prueba (g): 15 bar g • Temperatura de entrada: 60 °C • Temperatura de salida: 45 °C • Tubos: Agua • Flujo: 43,1 m³/h • Presión de operación: 3,5 bar g
FILTRO DE ACEITE	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción: Tipo cesta-doble • Flujo: 800 l/min • Presión de operación (g): 8~10 bar g • Malla de filtrado: 25 µm • Temperatura de operación: 45 °C
TANQUE DE ACEITE	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: 6.000 litros • Circulación de aceite: 7,8 veces por hora
VALVULA REDUCTORA DE PRESION	<ul style="list-style-type: none"> • Presión antes de la válvula (g): 8 bar g • Presión después de la válvula (g): 4 bar g
VALVULA CONTROLADORA DE PRESION (SEGURIDAD)	<ul style="list-style-type: none"> • Presión antes de la válvula (g): 11 bar g • Presión después de la válvula (g): 0 bar g
VALVULA CONTROLADORA DE PRESION (ALIVIO)	<ul style="list-style-type: none"> • Presión antes de la válvula (g): 10 bar g • Presión después de la válvula (g): 0 bar g
EXHAUSTOR DE NIEBLA	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo: 470 m³/h • Voltaje/Frecuencia: 480 V / 60 Hz

Anexo 25.

Características de la turbina CRO

TURBINA SST-060



Esta turbina prediseñada funciona como turbina de condensación y contrapresión, tiene una fabricación robusta para su funcionamiento seguro bajo condiciones extremas.

DATOS TECNICOS

- Potencia: hasta 6 MW
- Presión entrada: 131 bar(a)
- Temperatura: Hasta 530 °C
- Presión de salida: 29 bar (a)

**CARACTERISTICAS
PRINCIPALES**

- Longitud: 1,5 m
 - Anchura: 2,5 m
 - Altura: 2,5 m
 - Arranque rápido sin precalentamiento
 - Apropiada para CRO
 - Sistema de aceite integrado en el bastidor de base
-

Anexo 26.

Características del generador

MAQUINA SINCRONA SPW 900



La línea S de generadores, poseen una gran variedad de potencias, además una protección IP65W para las condiciones más extremas.

DATOS TECNICOS	<ul style="list-style-type: none">• Potencia: hasta 200 000 kVA• Tensión: hasta 13 800 V• Frecuencia: 50 Hz y 60 Hz• 1800 rpm
CARACTERISTICAS PRINCIPALES	<ul style="list-style-type: none">• Ruido: 90 dB• Refrigerante: IC81W• Lubricante: ISO VG 68• Sentido de giro para accionamiento: horario• Excitatriz principal<ul style="list-style-type: none">• Potencia: 116 kVA• Tensión de entrada: 85.2 Vcc• Corriente de entrada: 10.7 Acc• Tensión de salida: 315 Vcc• Corriente de salida: 257 Acc

	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia: 240 Hz • Numero de polos: 16 • Excitatriz auxiliar <ul style="list-style-type: none"> • Potencia: 2.6 kVA • Tensión: 170 Vca • Corriente: 8.8 Ica • Frecuencia: 180 Hz • Numero de polos: 12
--	--

Anexo 27

Características de los intercambiadores de calor



DESIGN & FUNCTION

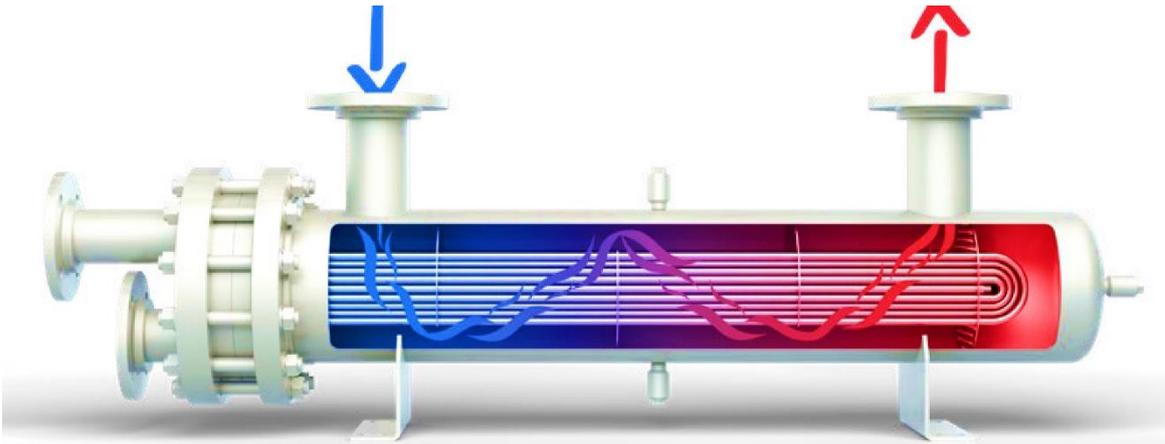
Our Shell&Tube V-type heat exchangers are designed for high temperature applications up to 300°C. Their BEU (acc. to TEMA) construction allows thermal expansion of the tube bundle which makes them an ideal solution for heat exchange between fluids with large temperature difference.

V-type heaters are widely used in marine installations. They are well known in heavy and light industry, power and chemical industry as well.

Our V-type heat exchangers are available in 5 different shell sizes with thermal lengths ranging from 400mm up to 3600mm. Our in-house software enables fast calculation and specification of the units according to your input data and requirements. BEU design of V-type heat exchangers enables the tube bundle to be removed for cleaning or replacement.

BENEFITS

- ▶ WORKING TEMPERATURE UP TO 300°C
- ▶ U-TUBE CONSTRUCTION ENABLES THERMAL EXPANSION OF THE BUNDLE
- ▶ REMOVABLE BUNDLE
- ▶ SUITABLE FOR SEA WATER APPLICATIONS
- ▶ TYPE APPROVAL FROM MOST COMMON MARITIME CLASSIFICATION SOCIETIES
- ▶ WORKS WITH VARIETY OF FLUIDS ON BOTH SHELL AND TUBE SIDE
- ▶ IN-HOUSE CALCULATION SOFTWARE



MODEL	SHELL SIZE [mm]	MAX THERMAL LENGTH [mm]	MAX CONNECTION SHELL SIDE EN*	MAX CONNECTION TUBE SIDE		
				EN flanges*		SAE flanges
				2 pass	4 pass	
V11	114,3	3600	DN50	DN32	DN25	1"
V16	168,3		DN80	DN65	DN40	1 1/2"
V22	219,1		DN100	DN80	DN65	2"
V27	273		DN125	DN100	DN80	3"
V32	323,9		DN150	DN125	DN100	4"

*Shell and tube side flanges can be either weld-neck or slip-on, depending on pressure ratings. In case of SAE flanges on tubeside, there is only one size per model.

MEDIA



SHELL SIDE <ul style="list-style-type: none"> ▶ Thermal Oil ▶ Fresh Water ▶ HFO ▶ Lubrication Oil ▶ MDO/MGO 	TUBE SIDE <ul style="list-style-type: none"> ▶ Thermal Oil ▶ Fresh Water ▶ Steam ▶ Sea Water
---	---

DESIGN DATA



DESIGN PRESSURE <ul style="list-style-type: none"> ▶ up to 16barg (for CuNi10 up to 10barg) 	DESIGN TEMPERATURE <ul style="list-style-type: none"> ▶ up to 300°C (for CuNi10 up to 280°C)
---	--

MATERIALS



SHELL SIDE <ul style="list-style-type: none"> ▶ Carbon Steel 	TUBE SIDE <ul style="list-style-type: none"> ▶ Carbon Steel ▶ Stainless steel ▶ CuNi30 ▶ CuNi10
--	--

APPLICATIONS



<ul style="list-style-type: none"> ▶ Cargo heaters ▶ Dump Coolers ▶ Thermal Oil Coolers/Heaters (Intermedium heaters) ▶ Lubrication Oil Heaters (Separator Heaters) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ HFO Heaters (Booster Heaters) ▶ Sea Water Heaters (Tank Cleaning Heaters/ Butterworth Heaters) ▶ Water Heaters/ Coolers
---	---

Anexo 28.

Características de las bombas (opción 1)

HALBERG

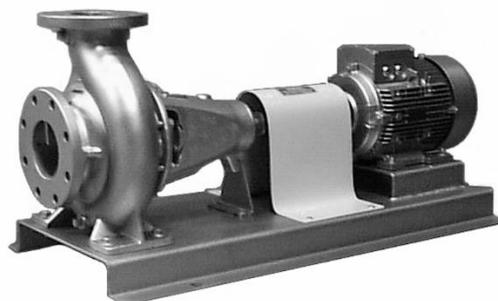
Pág. 2/8

NOWA 3213...25032

según EN 733 / DIN 24255 y transnorma

DATOS TECNICOS

Caudal	: Máx.	1300	m ³ /h
Altura	: Máx.	140	m
Velocidad	: Máx.	3600	r.p.m.
Temperatura	: Máx.	160	°C
Presión de la carcasa	: Máx.	16	bar
Cierre del eje	: Empaquetadura ó sello mecánico		



APLICACIONES

Las bombas centrífugas NOWA pueden emplearse en todas aquellas aplicaciones donde se tenga que trasegar líquidos limpios ó turbios no agresivos. Sus aplicaciones son principalmente:

- Abastecimiento de agua potable.
- Suministro de agua en general para agricultura e industria.
- Sistemas de rociadores (riego, contra incendio, etc.).
- Circulación de agua caliente hasta 160°C, agua de refrigeración y aceite en circuitos de refrigeración y calefacción.
- Bombeo de condensados gracias a un NPSH especialmente favorable
- En ejecución de bronce, fundición nodular, acero al carbono e inoxidable, pueden utilizarse en diferentes tipos de fluidos.

DESCRIPCION Y CONSTRUCCION

Bombas centrífugas con carcasa en espiral, horizontales de una sola etapa, con dimensiones y características de funcionamiento según EN 733 / DIN 24255 en construcción proceso, más tamaños transnorma.

El sistema proceso permite desmontar las partes giratorias hacia el lado del motor, sin necesidad de desacoplar las conducciones de aspiración y de impulsión. Si además se utiliza un acople de extensión, tampoco es necesario mover el motor.

El programa NOWA comprende 42 tamaños constructivos, pero mediante el empleo de unidades normalizadas, son utilizables solo seis (6) conjuntos de eje. Dentro de cada conjunto son intercambiables los siguientes elementos: el eje, el cierre del eje, la fijación del impulsor, los rodamientos y el soporte de los rodamientos (bastidor).

Apoyo del eje:

Un rodamiento rígido de una hilera de bolas según DIN 625 y un rodamiento de contacto angular de dos hileras de bolas según DIN 628, ambos con juego interno tipo C3 según DIN 620 y lubricados por grasa. Bajo pedido se pueden suministrar con lubricación por baño de aceite.

Presión máxima de trabajo (bar):

Rango de Temperatura	Ejecución de materiales (ver pág. 4)	
	0B / 0C / 3B	1A / 2A / 4B
-10 hasta 110 °C	10 ⁽¹⁾	16
110 hasta 160 °C	9	14

(1) En los tamaños 4026, 15050 y 20050: 14 bar hasta 30 °C

ATENCION: La presión máxima de trabajo es igual a la presión de aspiración más la presión de descarga para caudal cero

Bridas:

Bridas según ANSI B16.1 clases 125 ó 250, según el tipo de bomba. Posición de la brida de succión axial y de la brida de descarga radial orientada hacia arriba.

Sentido de giro:

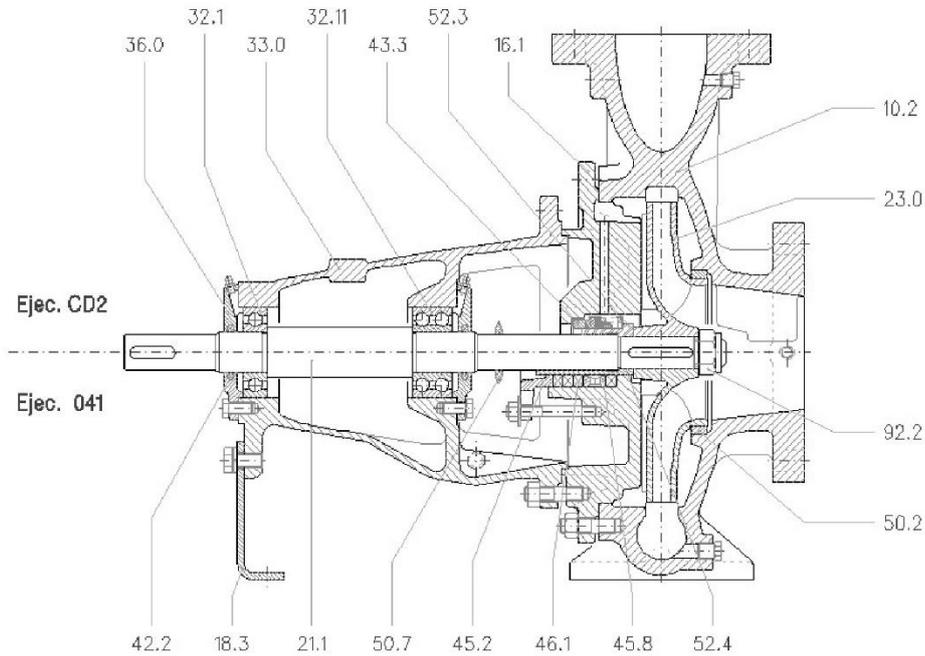
A la derecha (sentido horario), visto desde el extremo de accionamiento.

Cierre del eje:

El cierre del eje puede efectuarse mediante empaquetadura ó sello mecánico según sea requerido. En ambos casos, el eje está protegido por un casquillo de acero inoxidable.

- Ejecución 011: Prensaestopas prolongado sin anillo de cierre hidráulico. Temperatura: -10 hasta 110 °C.
- Ejecución 041: Prensaestopas no refrigerado, con lubricación interna por el mismo líquido bombeado. Temperatura: -10 hasta 110 °C.
- Ejecución 051: Prensaestopas no refrigerado, con lubricación por líquido externo (conexión de entrada y salida). Temperatura: -10 hasta 110 °C.
- Ejecución 541: Prensaestopas con lubricación interna por el mismo líquido bombeado y chaqueta de refrigeración. Temperatura hasta 160 °C (No disponible para conjunto de eje C-55).
- Ejecución CD2: Sello mecánico monoresorte, no balanceado, lavado internamente por el mismo líquido bombeado. Temperatura: -10 hasta 110 °C.
- Ejecuciones con sellos mecánicos especiales ó de proceso son posibles; consultar con la fabrica.

PLANO DE CORTE Y LISTA DE PARTES

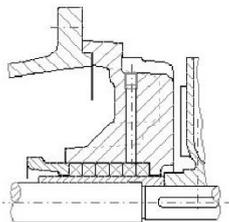


10.2	Carcasa	33.0	Soporte (Bastidor)	46.1	Empaquetadura
16.1	Tapa carcasa	36.0	Tapa rodamiento	50.2	Anillo de desgaste
18.3	Pata soporte	42.2	Anillo de fieltro	50.7	Anillo deflector
21.1	Eje	43.3	Sello mecánico	52.3	Casquillo del eje S.M.
23.0	Impulsor	45.2	Casquete prensaestopas	52.4	Casquillo del eje P.E.
32.1	Rodamiento exterior	45.8	Anillo de cierre hidráulico	92.2	Tuerca impulsor
32.11	Rodamiento interior				

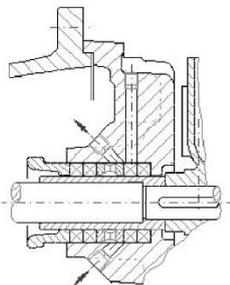
NOTA: Plano de corte de bomba con paletas dorsales. Los tamaños 15020, 15026, 20025 y todas las bombas con diámetro nominal del impulsor de 32, 40 y 50 cm, tienen anillo de desgaste en ambos lados del impulsor.

Otras ejecuciones de cierre del eje

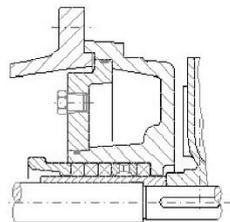
Ejecución 011
Prensaestopas prolongado
sin anillo de cierre hidráulico



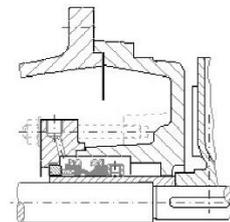
Ejecución 051
Prensaestopas con lubricación
por líquido externo



Ejecución 541
Prensaestopas con chaqueta
de refrigeración



Ejecución S.M. especiales
Sellos mecánicos especiales
o de proceso



Anexo 29.

Características de las bombas (opción 2)

BOMBAS ROPER

SERIES 3600



Bomba de engranes externos helicoidales, capaz de mover fluidos abrasivos y de alta temperatura con facilidad para que se pueda maximizar la eficiencia y minimizar el costoso tiempo de inactividad.

**CARACTERISTICAS
TECNICAS**

- Presiones de trabajo hasta 125 psi.
- Capacidad hasta 365 gpm.
- Viscosidad hasta 250,000 ssu.
- Distintos tipos de sello
- Flujo Bidireccional.
- Autocebante
- Engranés en acero endurecido como estándar.
- Manejo de altas viscosidades

OPCIONALES

- Caja reductora integrada.
 - Con y sin válvula de alivio interna.
 - Diferentes posiciones en puestos de succión y descarga.
 - Chaquetas de calentamiento.
-

APLICACIONES

- En industrias petroquímicas (para fluidos como gasolina, diésel, aceite)
- Industria de pinturas (tintas, resinas)
- Industria de alimentos (melaza)
- Industria metalmecánica (lubricantes)

MATERIALES

- Cuerpo: Fierro Fundido.
- Engranés: Acero endurecido.
- Flechas: Acero endurecido.
- Bujes: Bronce.
- Empaquetadura.

OPCIONALES

- Engranés: Acero inoxidable.
- Flechas: Acero inoxidable.
- Bujes: Carbón y Fierro.
- Posición de eje: Superior o inferior.
- Sello mecánico: Buna, Teflón® y Vitón.

DESEMPEÑO

Modelo	Desplazamiento por revolucion	Velocidad máxima	Flujo máximo a Velocidad máxima	Presión máxima	Conexiones
3611/3711	0.11 GPR	750 RPM	82.5 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	2" NPT
4611/4711	0.11 GPR	750 RPM	82.5 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	2" NPT
3617/3717	0.17 GPR	750 RPM	127.5 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	2" NPT
4617/4717	0.17 GPR	750 RPM	127.5 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	2" NPT
3622/3722	0.22 GPR	750 RPM	165 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	3" NPT
4622/4722	0.22 GPR	600 RPM	165 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	4" NPT
3632/3732	0.32 GPR	900 RPM	288 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	3" NPT
3635/3735	0.35 GPR	600 RPM	222 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	3" NPT
3643/3743	0.43 GPR	900 RPM	387 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	3" NPT
3648/3748	0.52 GPR	900 RPM	468 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	4" NPT O BRIDA
3658/3758	0.58 GPR	600 RPM	348 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	4" NPT O BRIDA
4658/4758	0.58 GPR	600 RPM	365 GPM	125 PSI (8.6 BAR)	4" NPT O BRIDA

Anexo 30.

Característica de los motores marca SEW

DR.. AC motors			
			
<p>Standard AC motors Well-established and safe – worldwide</p>			
Features	<ul style="list-style-type: none"> – Single-speed standard asynchronous motors, well established for many years in a wide variety of applications – Quality, very short delivery times and many expansion options are just three reasons for the worldwide success of these series 		
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> – Direct mounting to gear units from SEW-EURODRIVE – Can be delivered with SEW-EURODRIVE single or double brakes of different sizes and braking torque steps – Built-in encoders from SEW-EURODRIVE can be integrated directly in the motors which makes the drives even more compact – As a global motor with many approvals and certifications, it can be used in many markets worldwide without the need to adapt the parts list – Comprehensive offer of options and accessories – Simple installation and startup 		
Possible applications	<ul style="list-style-type: none"> – Timing belts – Hoists – Pumps – Fans – Logistics facilities 		
safetyDRIVE functional safety  Optional: integrated functional safety for DR.. motors	Safety encoders	Up to PL d according to EN ISO 13849-1	Incremental encoders: ES7S, EG7S, EV7S, EI7C FS NEW: EK8S Multi-turn absolute encoders: AS7W, AG7W, AS7Y NEW: AK8Y, AK8W
	Safety brake	Category 1 (cat. 1) according to EN ISO 13849-1 Category 3 (cat. 3) according to EN ISO 13849-1 Suited for integration into a safe brake system (SBS) up to performance level e (PL e).	BE.. / BT..

Technical data

Sizes	DR..63 – DR..315
Number of poles	2, 4, 6, 8, 4/2, 8/2, 8/4
Frequency Hz	50, 60
Rated power kW	0.09 – 225
Energy efficiency class	IE1 (DRS., DR2S.), IE2 (DRE.), IE3 (DRN.)
Duty types	Continuous duty and intermittent duty
Suitable for inverter operation	Yes
Available as brakemotor	Yes

Anexo 31.

Característica de los acoples

Rexnord® Omega® Elastomeric Couplings

Lowest Total Cost of Ownership

The unique split-in-half flex element and reversible hubs significantly decrease total costs by reducing inventory and assembly time.

Rexnord Omega Couplings are non-lubricated, material-flexing couplings utilizing a specially formulated polyurethane material engineered for maximum durability, strength and fatigue resistance. Omega couplings can operate in horizontal or vertical applications without additional components.

Easy installation and visual maintenance inspection make these couplings a perfect selection for a broad array of industrial applications.

Features and Benefits



- **Torsionally Soft Flex Element** cushions shock loads and vibration, extending equipment life.
- **Split-in-Half Element** design allows for simplified assembly and disassembly without disturbing hubs or connected equipment.
- **Polyurethane-to-Metal Bond** eliminates assembly and slippage problems associated with mechanically clamped designs.
- **Interchangeable Hubs** between close coupled and spacer coupling elements. Hubs have identical bolting patterns which allows for reduced inventory, and are reversible to accommodate a variety of shaft spacing arrangements. Hubs are available in carbon steel, 303-304 stainless steel, or with electroless nickel plating.

Element Design Options

Omega Coupling elements are offered in Close Coupled (E), Spacer (ES), and Half Spacer (E/ES) designs to accommodate a variety of standard and non-standard Distance Between Shaft Ends (DBSE). Spacer elements offer multiple radial bolting holes that accommodate all shaft gaps between the minimum and the maximum using the same components. Sleeve extensions are supplied when shaft spacing requirements require a greater DBSE than the standard spacer element can provide.

Element Options

Standard



- General purpose applications requiring the highest misalignment capacity

Heavy Duty Yellow (HDY)



- 25% greater torque capacity over Standard element catalog ratings allows for possible coupling downsizing
- Interchangeable with existing hubs

Hydrolytically Stable Urethane (HSU)

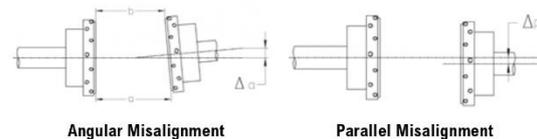
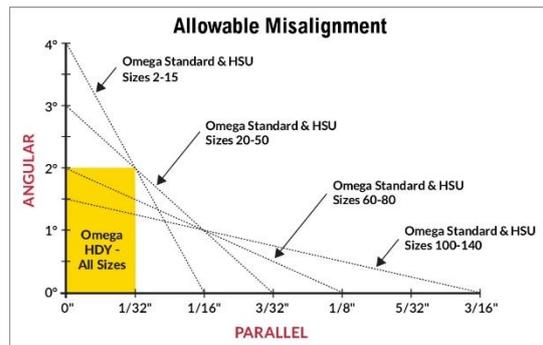


- Ideal for hot and humid conditions, acidic or alkaline environments
- 12-16 year shelf life
- Interchangeable with existing hubs

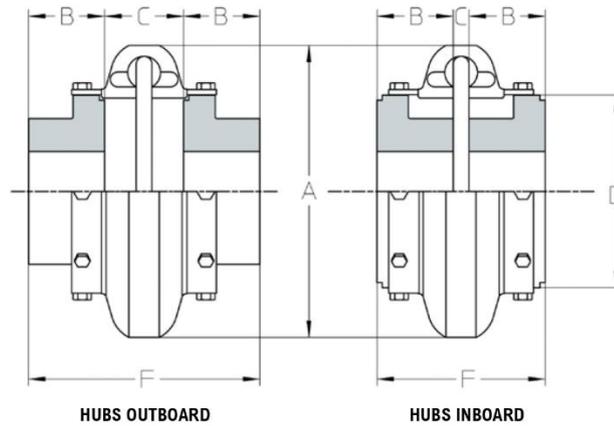
Misalignment Capacity

Omega Standard and HSU elements maintain their service life for any combination of parallel and angular misalignment measurements which fall on or below the line of the respective size. For Omega HDY, misalignment is limited to 2 degrees angular and 1/32" parallel. (Permissible misalignment values are shown in the yellow region and below the corresponding coupling size dotted line.)

Reliable and efficient equipment operation is directly related to coupling alignment.



Omega Close-Coupled Design with Straight Bore Hubs



NOTE: Hub shoulder design varies per coupling size. Consult Regal Rexnord™ for specific size assembly drawings.

Coupling Size	Maximum Bore (in) ⑤	Minimum Bore (in)	Continuous HP/100 RPM	Continuous Torque (lb-in) ②	Maximum RPM	Dimensions (in)						Weight (lb) ④	
						A	B	C		D	F		
								(In) ③	(Out)		(In)		(Out)
E2	1.13	No Min	0.30	190	6600	3.50	0.94	1.34	1.90	1.85	3.22	3.78	1.2
E3	1.38	0.375	0.58	365	6600	4.00	1.50	0.81	1.31	2.32	3.81	4.31	2.4
E4	1.63	0.375	0.88	550	6600	4.56	1.69	0.44	1.31	2.60	3.81	4.69	3.0
E5	1.88	0.375	1.48	925	6600	5.38	1.75	0.81	1.81	3.13	4.31	5.31	5.4
E10	2.13	0.375	2.30	1450	6600	6.38	1.88	0.56	1.84	3.65	4.31	5.56	8.2
E15	2.13	0.375	2.86	1800	6600	6.38	1.88	0.56	1.84	3.65	4.31	5.56	8.3
E20	2.38	0.75	3.65	2300	6600	7.25	2.06	0.50	2.38	4.48	4.62	6.50	13.0
E30	2.88	0.75	5.79	3650	5800	8.25	2.31	0.56	2.44	5.42	5.19	7.06	21
E40	3.38	0.75	8.85	5500	5000	9.50	2.50	0.56	2.68	6.63	5.56	7.68	35
E50	3.63	1.125	12.14	7650	4200	11.00	2.75	0.63	3.38	8.13	6.13	8.88	54
E60	4	1.125	19.84	12,500	3800	12.50	3.25	0.69	3.44	8.75	7.19	9.94	72
E70	4.5	1.375	35.12	22,125	3600	14.00	3.62	0.75	3.75	9.25	8.00	11.00	86
E80	6	1.875	62.7	39,500	2000	16.00	4.87	0.75	5.00	11.25	10.50	14.75	170
E100	6.75	1.875	135	85,050	1900	21.00	5.50	1.75	3.75	14.13	12.75	14.75	244
E120	7.5	1.875	270	170,100	1800	25.00	6.00	2.25	4.88	17.63	14.24	16.88	425
E140	9.00	1.875	540	340,200	1500	30.00	7.00	3.00	5.00	20.88	17.00	19.00	746

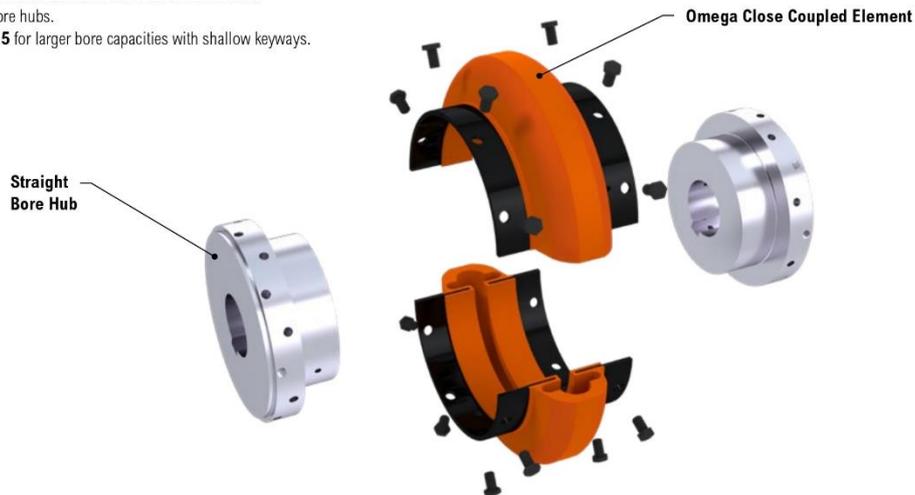
① HDY element continuous torque rating is 25% greater than Standard and HSU elements.

② Peak torque rating is 250% of the allowable Continuous Torque Rating.

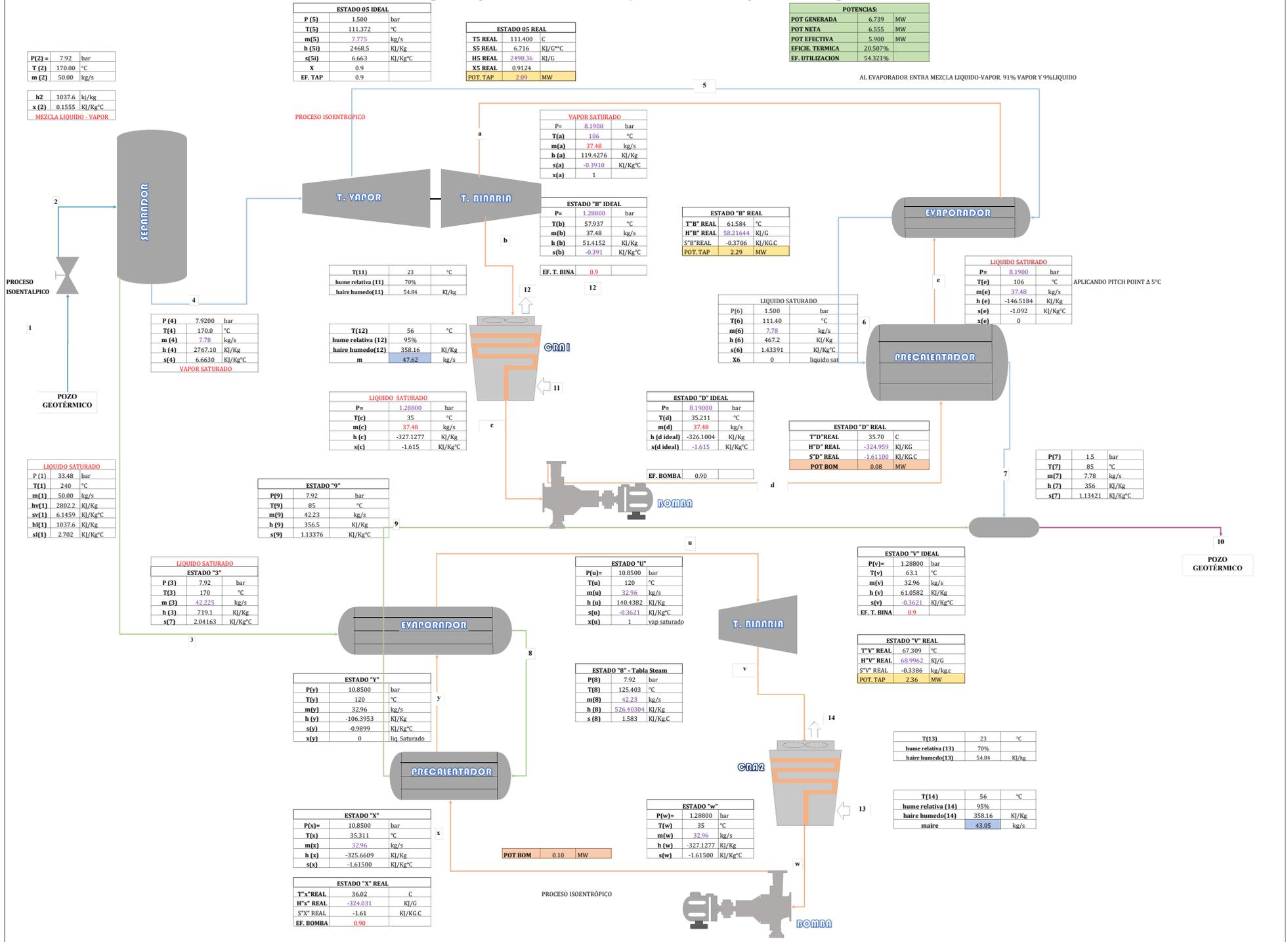
③ Minimum distance between shaft ends is .125 inches.

④ With max bore hubs.

⑤ See **page 15** for larger bore capacities with shallow keyways.



Anexo 32: Esquema general de una central flash binaria integrada con Isopentano



Anexo 33.

Evaluación económica al 6% de tasa de interés

Valor Actual Neto

$$VAN = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * (P/A, 6\%, 20) + 3\,287\,573 * (P/A, 6\%, 20) + 92\,278 * (P/A, 12\%, 20)$$

$$VAN = -21\,361\,996 - 1\,068\,100 * 11.47 + 3\,287\,573 * 11.47 + 92\,278 * 11.47$$

$$VAN = 5\,153\,607$$

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno se mantendría igual, ya que no hay cambios en su formulación.

$$TIR = 9.14\%$$

Se puede observar que a una tasa de interés del 6%, el proyecto se hace económicamente rentable y viable.