

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA EN
MOQUEGUA DE 8 MW

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

AUTOR

CARLOS GUILLERMO GAMARRA CHUYO

ASESOR

HUGO WALTER MUNDACA GUERRA

<https://orcid.org/0000-0002-8210-9581>

Chiclayo 2021

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA CENTRAL
GEOTÉRMICA EN MOQUEGUA DE 8 MW**

PRESENTADA POR:

CARLOS GUILLERMO GAMARRA CHUYO

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Amado Aguinaga Paz
PRESIDENTE

Jony Villalobos Cabrera
SECRETARIO

Hugo Walter Mundaca Guerra
VOCAL

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres Guillermo Gamarra Cabrera, Marielena Chuyo Gómez, a mi hermano Aarón Gamarra Chuyo y a mi tío Doménico Bonarrigo Portocarrero.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por estar presentes no solo en esta etapa tan importante de mi vida sino en todo momento ofreciéndome lo mejor y buscando lo mejor para mi persona, no ha sido sencillo el camino que he recorrido durante esta etapa, pero con esfuerzo, dedicación he podido lograr mi meta.

Índice

I.	Introducción.....	10
1.1	Realidad Problemática	10
II.	Marco teórico.....	12
2.1	Estado del arte.....	12
2.1.1	Antecedentes.....	12
2.1.2	Formulación del Problema.....	15
2.1.3	Formulación de la Hipótesis	15
2.1.4	Objetivos.....	15
2.1.5	Justificación	15
2.2	Bases Teóricas Científicas	16
2.2.1	Clases de Regiones Geotérmicas	16
2.2.2	Modelos Termodinámicos para Centrales Geotérmicas.....	17
2.2.3	Análisis Termodinámico de los Componentes de un Ciclo Binario.....	27
2.2.4	Análisis del flujo másico del fluido de trabajo	31
2.2.5	Cálculo de Temperatura de salida del fluido (geofluido y agua blanda)..	31
2.2.6	Cálculo del volumen y costo del Agua Blanda	35
2.2.7	Análisis físico y dinámico de la transferencia de calor entre el geo fluido y agua blanda.....	36
2.2.8	Cálculo para la selección del intercambiador de calor	40
2.2.9	Cálculo del volumen y costo del Isobutano.....	42
2.2.10	Cálculo para la selección del generador	43
2.2.11	Cálculo de dimensión de tubería	44
2.2.12	Cálculo de dimensión de Tubería a partir de datos de la bomba.....	44
2.2.13	Cálculo del espesor del aislamiento térmico	44
2.2.14	Criterios para la Evaluación Económica	46
III.	Metodología.....	48
3.1	Analizar la situación actual de la generación y transmisión de energía eléctrica en el Perú	48
3.2	Determinación de la Ubicación Geográfica de la Central Geotérmica.....	56
3.2.1	Zona Geotermal de Titire- Puente Bello.....	58
3.2.2	Zona Geotermal de Jesús María, Ichuña y Tolapalca.....	61
3.2.3	Zona Geotermal de Calacoa	63
3.2.4	Zona Geotermal De Ullucan-Omate.....	66
3.2.5	Zona Geotermal de Ubinas	68
3.2.6	Zona Geotermal de Crucero	71
3.3	Evaluación del potencial energético de la central geotérmica	73

3.4	Dimensionar la Central Geotérmica.....	116
3.5	Determinar la evaluación económica del dimensionamiento de la Central Geotérmica.....	117
3.5.1	Análisis de la Inversión	117
3.5.2	Costo de Generación del kW.h.....	119
3.5.3	Precio de venta de generación de energía electricidad	119
IV.	Conclusiones.....	120
V.	Recomendaciones	121
VI.	Referencias	122
VII.	Anexos	125

Lista de cuadros

Cuadro 1: Centrales Geotérmicas en Centroamérica 2011.....	18
Cuadro 2: Comparación entre cantidades de centrales de los periodos 2014 y 2016.....	49
Cuadro 3: Producción de energía eléctrica (GW.h) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2014 Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional	51
Cuadro 4: Máxima Demanda (MW) del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2014Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.....	52
Cuadro 5: Potencia Efectiva (MW) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2014Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.	53
Cuadro 6: Costo Marginal Promedio del SEIN (US\$/MW.h) y Tarifa de Energía del año 2014	53
Cuadro 7: Producción de energía eléctrica (GW.h) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2016	54
Cuadro 8: Máxima Demanda (MW) del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2016	55
Cuadro 9: Potencia Efectiva (MW) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2016.....	55
Cuadro 10: Costo Marginal Promedio del SEIN (US\$/MW.h) y Tarifa de Energía del año 2016	56
Cuadro 11: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas	59
Cuadro 12: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas	59
Cuadro 13: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros	60
Cuadro 14: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas	62
Cuadro 15: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas	62
Cuadro 16: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros	63
Cuadro 17: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas	64
Cuadro 18: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas	64
Cuadro 19: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros	66
Cuadro 20: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas	66
Cuadro 21: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas	67
Cuadro 22: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros	68
Cuadro 23: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas	69
Cuadro 24: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas	69
Cuadro 25: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros	70
Cuadro 26: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas	71
Cuadro 27: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas	71
Cuadro 28: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros	72
Cuadro 29: Datos de la Tubería enterrada en el sub suelo	73
Cuadro 30: Datos del geo fluido en el sub suelo	73
Cuadro 31: Datos del agua blanda en la entrada del intercambiador	74
Cuadro 32: Datos de entrada y salida del agua blanda y del intercambiador	79
Cuadro 33: Datos de entrada, salida del agua blanda y del refrigerante Isobutano.....	81
Cuadro 34: Parámetros para el diseño y selección del condensador	91
Cuadro 35: Datos para calcular el espesor del aislamiento	96
Cuadro 36: Datos para calcular el espesor del aislamiento	98
Cuadro 37: Datos para calcular el espesor del aislamiento	100

Cuadro 38: Datos para calcular el espesor del aislamiento	103
Cuadro 39: Datos para calcular el espesor del aislamiento	106
Cuadro 40: Espesores mínimos de aislamiento (mm) de tuberías y accesorios	107
Cuadro 41: Datos para calcular el espesor del aislamiento	107
Cuadro 42: Datos para calcular el espesor del aislamiento	111
Cuadro 43: Datos para calcular el espesor del aislamiento	115
Cuadro 44: Espesores mínimos de aislamiento (mm) de tuberías y accesorios	115
Cuadro 45: Descripción de Cada Equipo de la Central Geotérmica	116
Cuadro 46: Descripción de Inversión para el Reconocimiento, Exploración e Instalación	117
Cuadro 47: Costos de los elementos de la Central Geotérmica.....	118
Cuadro 48: Descripción de gastos al año.....	119

Resumen

A través de los años se ha incrementado la demanda de energía eléctrica en el Perú, además se ha limitado el crecimiento de las centrales de fuentes renovables ocasionando una dependencia hacia las centrales no renovables y una baja diversificación de la matriz energética; por tal motivo se realizaron diferentes estudios de aprovechamiento de recursos renovables para la generación de energía eléctrica.

Basándose en estos estudios se desarrolló un proyecto de dimensionamiento de una central eléctrica en Moquegua, el cual pueda conectarse al SEIN. El objetivo general fue Dimensionar una central geotérmica de 8 MW en Moquegua, así mismo se planteó como objetivos específicos Analizar la situación actual de la generación y transmisión de energía eléctrica en el Perú, Determinar la ubicación geográfica de la central geotérmica, Evaluar el potencial energético de la central geotérmica y Dimensionar la central geotérmica. Los resultados evidenciaron que la instalación de la central geotérmica es viable.

Palabras clave: Generación Geotérmica, Central Geotérmica, Potencial Energético del Suelo Peruano, Energía Limpia, Abastecimiento Energético Sustentable, Matriz Energética Diversificada.

Abstract

Through the years the demand for electrical energy in Peru has increased, it has also limited the growth of renewable energy plants, causing dependency on non-renewable plants and low diversification of the energy matrix; for this reason, different studies on the use of renewable resources were carried out.

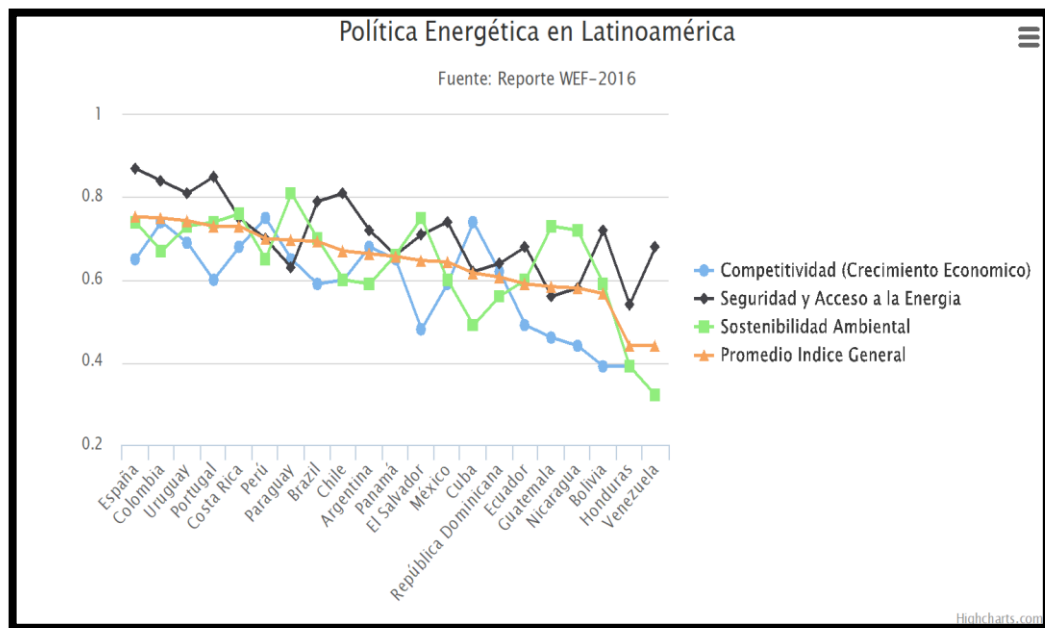
Based on these studies, a dimensioning project for a plant in Moquegua was developed, which can be connected to the SEIN. The general objective was to size an 8 MW geothermal power plant in Moquegua, as well as specific objectives. Analyze the current situation of electricity generation and transmission in Peru, Determine the geographical location of the geothermal power plant, Evaluate the energy potential of the geothermal power station and Dimension the geothermal power station. The results showed that the installation of the geothermal power plant is viable.

Keywords: Geothermal Generation, Geothermal Power Plant, Energetic Potential of Peruvian Soil, Clean Energy, Sustainable Energy Supply, Diversified Energy Matrix.

I. Introducción

1.1 Realidad Problemática

El sector energético en las últimas décadas ha registrado un importante crecimiento debido a la demanda interna la cual está asociada al desarrollo económico de productos y servicios de calidad a precios accesibles al mercado. Ver grafica1. [1]



Gráfica 1: Índice de Crecimiento de la Política Energética en Latinoamérica.
Fuente: OSINERMING

La base de este auge económico fue el soporte del suministro energético seguro, el cual se debe principalmente al gas natural, que permitió cubrir la demanda adicional. Asimismo, la oferta de las otras fuentes de energía no renovables registró un leve descenso; esta situación trajo como consecuencia el incremento de su importación como en el caso del petróleo crudo; adicionalmente, se produjo un crecimiento limitado para las fuentes renovables como las hidroeléctricas, ocasionando una baja diversificación de las fuentes de generación de energía eléctrica. [1]

Para mantener este desarrollo económico, ambiental y un mejor acceso a diferentes tipos de energía, el gobierno Peruano se plantea el objetivo de pertenecer a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en diez años, un tiempo relativamente corto, para lo cual se ve obligado a realizar una serie de reformas y mejora de las instituciones, que permitan obtener

una mejor competitividad y transparencia, logrando así que nos catapulten a los mejores estándares internacionales. [2]

Cabe resaltar que en la actualidad un 27% de los requerimientos de la OCDE son ambientales. En ese sentido en el Perú, las emisiones de gases (CO₂) son producidas a consecuencia de la pérdida de biomasa forestal, de los gases liberados en la actividad agrícola, de la descomposición de residuos sólidos como también de las aguas residuales y del consumo de energía fósil (petróleo, gas y carbón) las cuales se usan para el transporte, generación de energía eléctrica y en el sector público e industrial. [3]

Por este motivo la Política Energética Nacional del Perú 2010 – 2040, aprobada en el 2010, tiene como uno de sus objetivos la diversificación la matriz energética Peruana con énfasis en las fuentes renovables; las cuales deberán satisfacer la demanda energética de manera confiable, regular, continua y eficiente.

Los objetivos de la política energética del país a mediano y largo plazo han sido aprobados por el Decreto Supremo N° 064-2010-EM, El D.S N° 012-2011-EM y El D.S N° 020- 2013-EM que incluyen:

- Matriz energética diversificada, competitiva, con énfasis en el uso de recursos renovables y eficiencia energética.
- Abastecimiento para el desarrollo sustentable
- Acceso universal al suministro de energía.
- Eficiencia en la oferta y en la demanda de energía.
- Autosuficiencia en la producción de energía.
- Mínimo impacto ambiental.
- Desarrollo de la industria del gas.
- Fortalecimiento institucional.
- Integración con mercados de Energía de la región.
- Impulso al desarrollo de fuentes de energía geotérmica.
- Tarifas estables a largo plazo (determinadas mediante subastas).

Según el Plan Numes (Nueva Matriz Energética Sostenible), la diversificación de la oferta de generación energética deberá ser para el año 2040:

- Hidroenergía, 40%
- Gas (Térmica), 40%

- Recursos Renovables alternativos, RER, 20% [4]

II. Marco teórico

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes

- ❖ Marietta Sander, Bochum University of Applied Sciences, Alemania, Geothermal Energy Development in Latin America and the Caribbean and the Role of International Development Partners, Bochum University of Applied Sciences, Abril del 2015. En este artículo científico se expone que existe una necesidad de mecanismos para superar los riesgos iniciales asociados con la exploración y confirmación de recursos geotérmicos, tales como estudios iniciales, prospección geológica y perforación de pruebas; debido a esto se propone que empresas privadas o públicas realicen la planificación regional de la energía y los mecanismos de distribución de riesgos, demostrando así la viabilidad de la energía geotérmica para que a largo plazo, el Estado, junto con el sector privado y las instituciones académicas puedan realizar el diseño de centrales geotérmicas. [5]

Por último, en este artículo se ha demostrado las áreas de interés para la energía geotérmica la cual se observa en la siguiente figura 1.

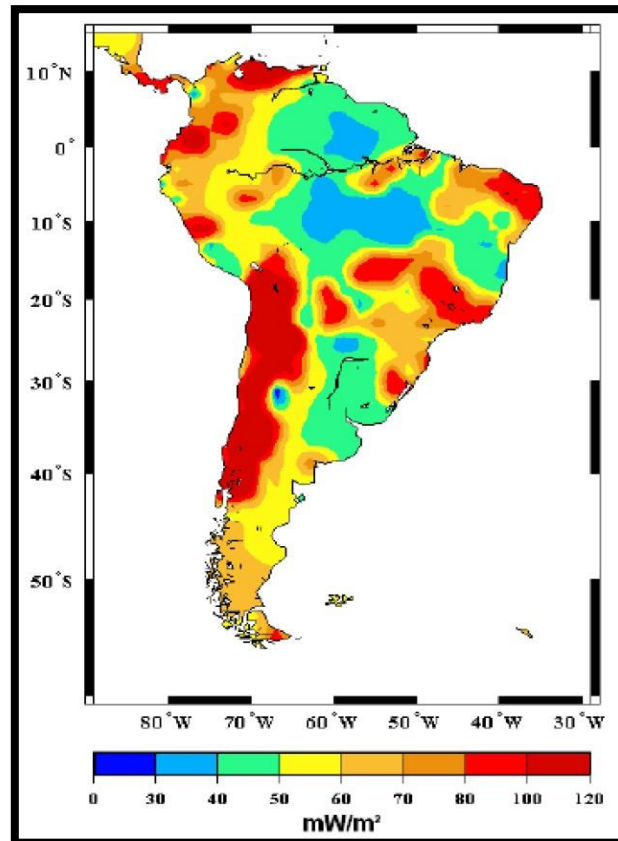


Fig. 1: Mapa del Flujo de Calor de América del Sur.

Fuente: El mapa de flujo de calor continental de Cardoso, Hamza y Alfaro (2010).

Zonas de calor elevado:

- ✓ La mitad norte de Chile.
- ✓ Altiplano (área de alta montaña) en Bolivia.
- ✓ Partes del cinturón peruano del oeste de los Andes, y lugares a lo largo del arco magmático del oeste de Ecuador, cinturón volcánico central de Colombia y el sur de Venezuela. [5]

- ❖ José Roberto Estevez Salas, United Nations University, Geothermal Power Plant Projects in Central America: TECHNICAL AND FINANCIAL FEASIBILITY ASSESSMENT MODEL, Reporte 4 Noviembre 2012. En este proyecto de investigación se determinó que los proyectos de desarrollo geotérmico en Centroamérica tienen indicadores rentables a partir de una capacidad específica de la planta, dependiendo de la tecnología de la planta seleccionada. [6]

Para confirmar lo anteriormente escrito se realizó un estudio en el cual evaluaron tres ciclos termodinámicos a partir de un flujo másico que oscilaba entre 100 y 1.000 kg / s. [6]

Los dos primeros ciclos de vapor (simple y doble) utilizaron temperaturas de depósito que oscilaban entre 160 y 340°C y para el ciclo binario (ciclo orgánico Rankine) se utilizaron temperaturas de depósito entre 100 y 180°C.

En el caso del ciclo de vapor simple los resultados sugirieron que se debería utilizar temperaturas de depósito inferiores a 200°C con un flujo másico superior de 400 kg / s para obtener una planta de hasta 30MW de potencia.

Para el ciclo de vapor doble los resultados sugirieron que la temperatura del depósito debería ser la misma que del ciclo de vapor simple y que el flujo másico debería de variar entre un 10% al 20% menos que del ciclo de vapor simple para obtener una planta de hasta 30MW de potencia.

Y por último en el caso del ciclo binario se sugiere que la temperatura del depósito tiene que ser mayor o igual a 130°C con un flujo másico superior a 900 kg /s para desarrollar plantas de energía mayores de 18MW de potencia. [6]

El estudio concluyo que existe un alto riesgo técnico y financiero asociado a proyectos de vapor simple, doble cuya potencia generada en la planta sea inferior de 24MW y proyectos de ciclo binario cuya potencia generada sea menor a 18MW, teniendo una la probabilidad de éxito de alrededor del 50% para lograr la tasa mínima de retorno atractiva requerida por los inversores. El análisis de riesgos sugiere que el factor financiero más importante que afecta la rentabilidad del proyecto es el precio de la energía y el factor de disponibilidad de la planta más que los costos de perforación y de la planta de energía. [6]

- ❖ INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica°58 Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región de Moquegua, Lima – Perú 2014. En este boletín se realizó un estudio de recursos geotérmicos mediante geotermometría química en fase líquida los cuales concluyeron que la región de Moquegua presenta temperaturas desde 140 °C en algunas zonas y en otras las temperaturas superan los 200 °C, por lo cual está clasificado como sistema geotérmico de entalpia intermedia a alta, por lo

tanto, puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica; Además, se determinó que el potencial geotérmico de la región Moquegua es de 240 MW, calculado por la WEST JEC, mediante el método volumétrico, en combinación con el análisis de Montecarlo. [7]

2.1.2 Formulación del Problema

¿Será posible realizar el dimensionamiento de una central geotérmica en Moquegua que genere potencia eléctrica de 8 MW para suministrar energía eléctrica al sistema interconectado nacional?

2.1.3 Formulación de la Hipótesis

Si existe el potencial energético en Moquegua para realizar el dimensionamiento de una central geotérmica, y además se puede suministrar energía eléctrica al sistema interconectado nacional.

2.1.4 Objetivos

- ❖ **Objetivo General**
 - ✓ Dimensionar una central geotérmica de 8 MW en Moquegua.
- ❖ **Objetivos Específicos**
 - ✓ Analizar la situación actual de la generación y transmisión de energía eléctrica en el Perú.
 - ✓ Determinar la ubicación geográfica de la central geotérmica.
 - ✓ Evaluar el potencial energético de la central geotérmica.
 - ✓ Dimensionar la Central Geotérmica.
 - ✓ Definir una propuesta de evaluación económica para la construcción de la central geotérmica.

2.1.5 Justificación

❖ **Justificación Social**

La instalación de una central geotérmica en el sur del país constituye una alternativa de diversificación de la matriz energética en el país, evitando la dependencia a sistemas basados en energéticos del tipo fósil.

❖ **Justificación Económica**

La instalación de una central geotérmica generará ofertas de trabajo, trayendo consigo beneficios económicos a los trabajadores y a sus comunidades en trabajos colaterales.

El costo de potencia eléctrica que genera una central geotérmica es menor que el costo de potencia eléctrica que genera una central térmica.

❖ **Justificación Tecnológica**

La actual matriz de generación de energía eléctrica no cuenta con la instalación de una central de este tipo, por lo que su utilización favorecerá la ampliación de la matriz energética y la seguridad energética del Perú lo cual es un adelanto tecnológico.

❖ **Justificación Ambiental**

El uso de energía geotérmica no utiliza combustible fósil y es renovable, por lo que su utilización tiene un bajo impacto ambiental; una central geotérmica genera 1/6 de las emisiones de CO₂ por kW.h que produce una central térmica la cual trabaja con gas natural, por lo que generalmente cumple con los límites de emisión establecidos. [8]

2.2 Bases Teóricas Científicas

2.2.1 Clases de Regiones Geotérmicas

Se clasifican en tres categorías de acuerdo a su temperatura y a su gradiente térmico:

1. Hipertérmicas o de alta entalpía

Son aquellas regiones geotérmicas en las que los gradientes de temperatura son superiores a 80-100 °C.km⁻¹ y en las que puede acceder a agua caliente o vapor, a temperaturas de 150-200 °C, generadas por contacto entre un acuífero y rocas próximas a la superficie. Estas zonas suelen encontrarse próximas a áreas de actividad volcánica, o a los bordes de placas. [9]

2. Semitérmicas o de entalpía media

Son aquellas regiones geotérmicas en las que el gradiente de temperatura varía entre 40 y 80 °C.km⁻¹ y donde pueden encontrarse fuentes de calor a temperaturas de hasta 100 °C, no aptas para la generación de electricidad, pero que permiten la utilización de los recursos térmicos para suministrar

calefacción, agua caliente a zonas próximas, y calor para procesos agrícolas o para procesos de secado y precalentamiento en ciertos procesos industriales. Estas zonas se encuentran alejadas de los bordes de placa y el calor se extrae accediendo a acuíferos naturales calientes. [9]

3. Normal o de baja entalpía

Son aquellas zonas geotérmicas en las que los gradientes de temperatura son inferiores a $40^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ y en las que el flujo de calor en la superficie es del orden del valor promedio, $0,06 \text{ W.m}^{-2}$ y de las que difícilmente se puede extraer energía a precios competitivos. [9]

2.2.2 Modelos Termodinámicos para Centrales Geotérmicas

Para evaluar el potencial de energía eléctrica que se obtiene a partir de la energía geotérmica, se han desarrollado tres modelos termodinámicos en las centrales geotérmicas convencionales; los cuales son: Ciclo de vapor rápido simple (C.V.R.S), ciclo de vapor rápido doble (C.V.R.D)) los cuales son utilizados con temperaturas desde 160 a 340°C y ciclo de Rankine orgánico (ORC) o también conocido como ciclo binario cuyas temperaturas de trabajo son desde 85 a 180°C . [10]

Estos tres modelos, como se muestra en el cuadro 1, son los ciclos más comunes instalados en la región de centro américa.

Cuadro 1: Centrales Geotérmicas en Centroamérica 2011

País	Nombre de la Planta Eléctrica	Unidades	Tipo de Unidad	Capacidad Total Instalada MW
El Salvador	Ahuachapan	unidades 1-2	C.V.R.S	30
	Ahuachapan	unidad 3	C.V.R.D	35
	Berlin	unidades 1-2	C.V.R.S	28
	Berlin	unidad 3	C.V.R.S	44
	Berlin	unidad 4	Binary	9,4
Guatemala	Orzunil	unidades 1-7	Binary	24
	Ortitlan	unidad 1	Binary	25,2
Costa Rica	Miravalles	unidades 1-2	C.V.R.S	55
	Miravalles	unidad 3	C.V.R.S	29,5
	Miravalles	unidad 5	Binary	21
Nicaragua	Momotombo	unidades 1 -2	C.V.R.S	35
	Momotombo	unidad 3	Binary	7,5

Fuente: Geothermal Power Plant Projects in Central America: Technical and Financial Feasibility Assessment Model.

❖ CICLO DE VAPOR RAPIDO SIMPLE

El ciclo de vapor rápido simple utiliza la energía geotérmica de altas temperaturas para generar energía eléctrica; este ciclo se puede dividir en dos tipos según la modalidad de escape del vapor de la turbina.

Para la primera modalidad se utiliza una turbina de vapor de escape atmosférico (contrapresión) en la cual el ciclo cuenta con cinco estados como se muestra en la figura 2, teniendo como inicio de ciclo el pozo geotérmico donde se producen fluidos de dos fases, que consisten en salmuera y vapor de agua (estado 1); el agua y las partículas sólidas entran a una válvula de estrangulación donde pierden presión con la finalidad de mantener la presión de separación requerida para entrar al separador (estado 2); en el separador el fluido comenzará a hervir y se separará el vapor saturado de las partículas adicionales; se asume que la entalpía del fluido geotérmico que fluye desde el

pozo es constante, lo que significa que es un proceso isoentálpico donde no existe pérdidas de calor. En el estado 3 el vapor saturado es dirigido a la turbina en la cual se expande, la turbina se encuentra acoplada a un generador de producción de energía eléctrica. En el estado 4 el vapor sale de la turbina a la atmósfera y en el estado 5 la salmuera que se encuentra en el separador de la cual sale y se inyecta al pozo geotérmico. [11]

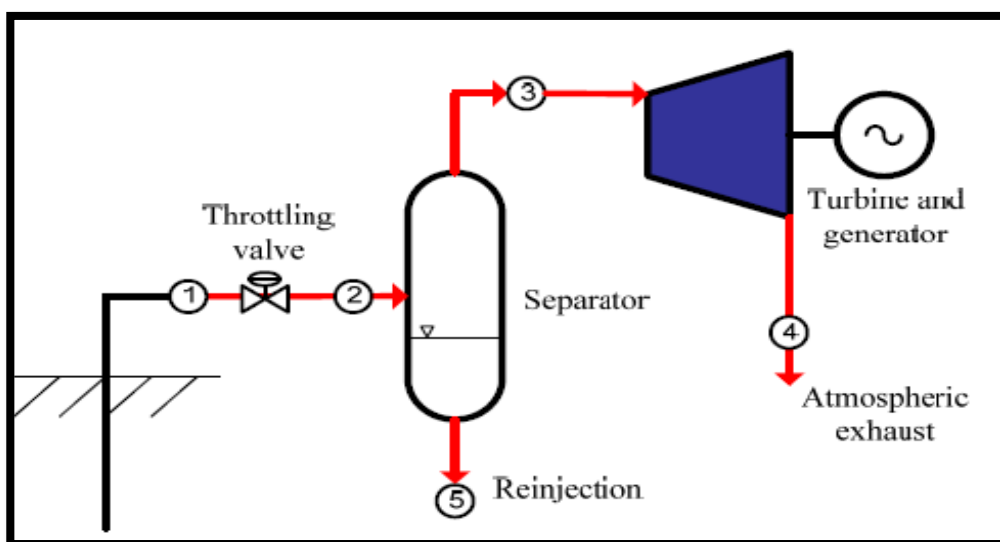


Fig. 2: Diagrama esquemático de una planta de vapor rápido simple con escape atmosférico.

Fuente: Feasibility Study of Geothermal Utilization of Yangbajain Field in Tibet Autonomous Region, P.R.China.

Esta modalidad es la más simple y tiene menor costo económico; en ella la turbina de vapor es de flujo axial convencional que descarga directamente a la atmósfera, su consumo aproximadamente es el doble de vapor por kilovatio de salida y por lo tanto es un desperdicio de energía. Sin embargo, es comúnmente utilizado como una planta piloto para generar energía eléctrica a partir de la descarga de los pozos de prueba durante el desarrollo del campo. [11]

Para la segunda modalidad se utiliza una turbina de vapor de condensación en el escape como se muestra en la figura 3, es una mejora termodinámica del diseño de escape atmosférico, dado que el vapor que sale de la turbina (estado 6) no es descargado a la atmósfera, sino que se descarga a una cámara de condensación en el cual es enfriado por aire de refrigeración, cuyo aire entra en el condensador en el estado c1 y sale en el estado c2. Finalmente el vapor que es condensado sale (estado 7) y es reinyectado en el estado 4. [12]

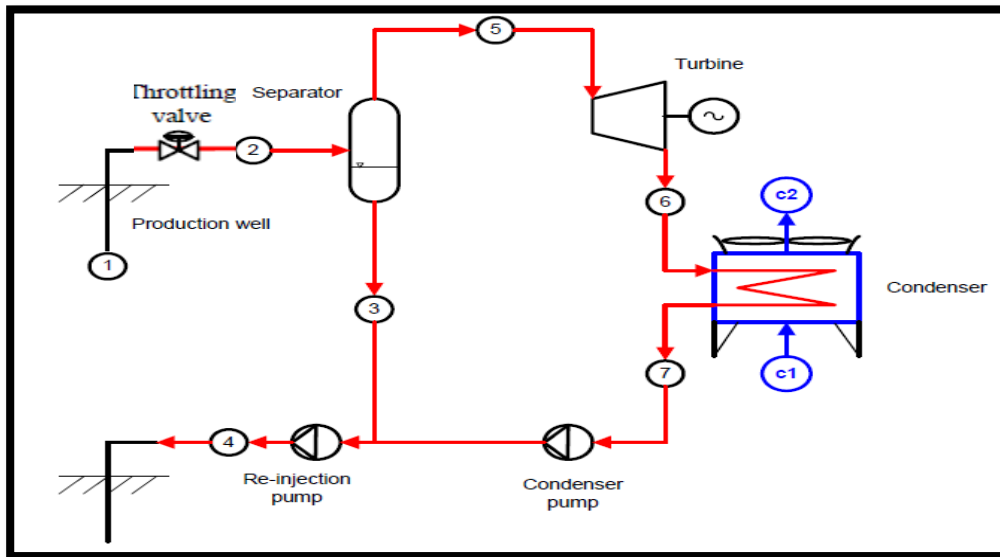


Fig. 3: Diagrama esquemático del sistema vapor rápido simple de condensación en el escape.

Fuente: Geothermal Power Plant Cycles and Main Components.

Para concluir con la explicación y entender mejor su proceso de la segunda modalidad del ciclo de vapor rápido simple es necesario recurrir a los diagramas termodinámicos de T-s y de T-h los cuales se muestran en la figura 4 y en la figura 5.

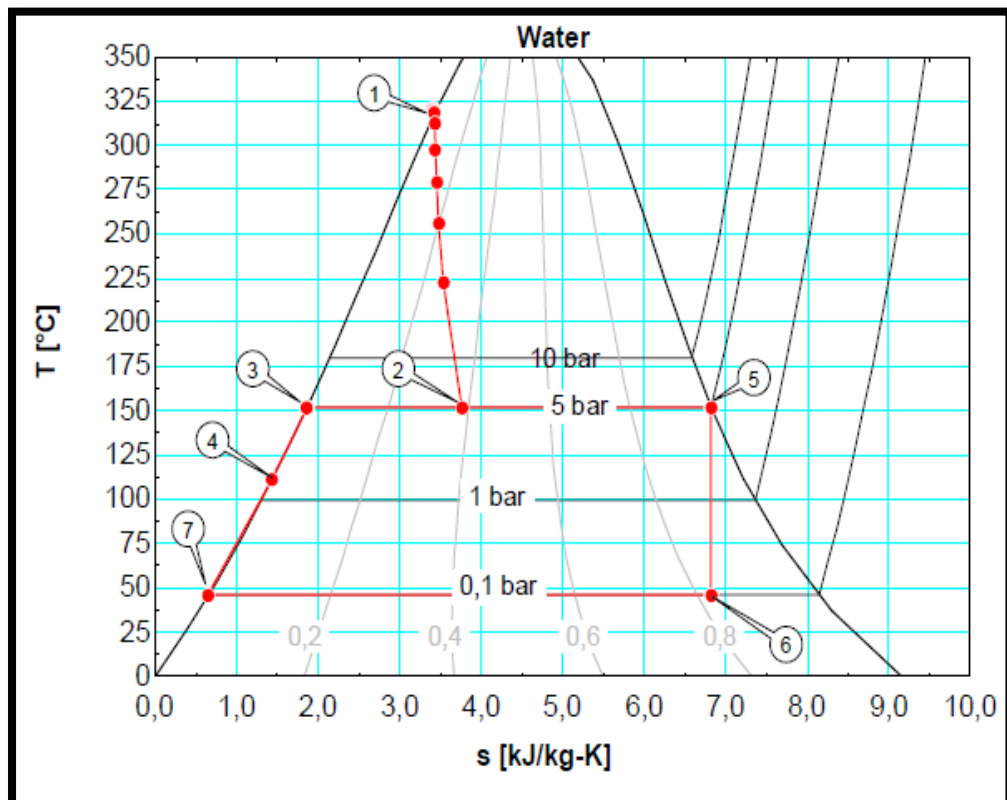


Fig. 4: Diagrama T-s de un ciclo vapor rápido simple.

Fuente: Geothermal Power Plant Cycles and Main Components.

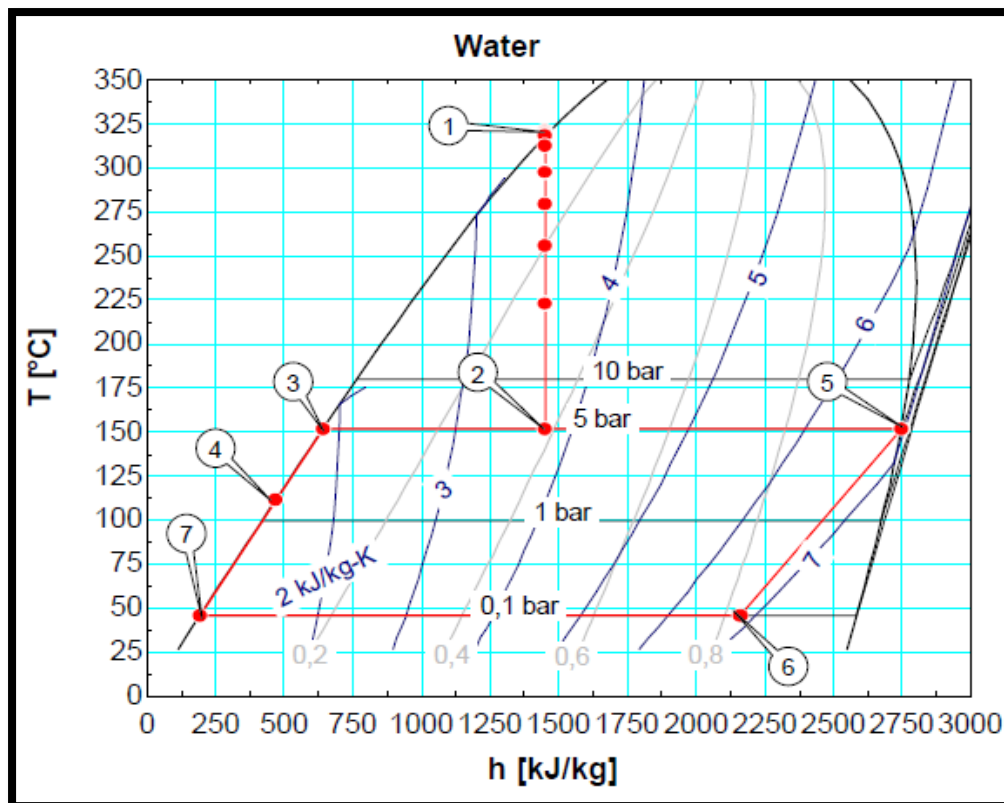


Fig. 5: Diagrama T-h de un ciclo vapor rápido simple.
Fuente: Geothermal Power Plant Cycles and Main Components.

❖ CICLO DE VAPOR RÁPIDO DOBLE

El ciclo de vapor rápido doble cuenta con un proceso parecido al del ciclo de vapor rápido simple, la diferencia es la inclusión de una etapa de presión secundaria, que utiliza el calor residual en la salmuera geotérmica del separador de alta presión (HP), la cual será introducida en un segundo separador de baja presión (LP) donde se mezclará con otro vapor húmedo que sale de la turbina de alta presión para obtener una mayor calidad del vapor. El vapor extra que se gana pasa a través de una turbina de baja presión, y se genera energía adicional del generador acoplado con la segunda turbina. [13]

Este ciclo cuenta con diez estados, el cual comienza en el pozo geotérmico donde se producen fluidos de dos fases, que consisten en salmuera y vapor (estado 1). Después el agua y las partículas sólidas entran a una válvula de estrangulación donde pierden presión para mantener la presión de separación requerida para entrar al separador donde el fluido comienza a hervir y se separe el vapor sobre calentado del vapor saturado y partículas adicionales (estado 2). La salmuera que sale del separador está en el estado 3 y es estrangulada hasta

un nivel de presión más bajo en el estado 8. La salmuera parcialmente cocida se conduce después a un separador de baja presión, donde el vapor es conducido a la turbina en el estado 9. La turbina está diseñada de tal manera que la diferencia de presión sobre las primeras etapas es la misma que la diferencia de presión entre los separadores de alta y baja presión. El flujo masivo en las etapas de presión más baja de la turbina es entonces más alto que en las etapas de alta presión, justo lo contrario de lo que ocurre en una central eléctrica de combustible tradicional con un sangrado para los calentadores de agua de alimentación de la turbina. [14]

La salmuera del separador de baja presión está en el estado 10, y después se vuelve a inyectar en el estado 4, la condición de retorno del fluido geotérmico. El vapor del separador de alta presión está en el estado 5, donde el vapor entra en la turbina. El vapor de baja presión entra en la turbina unas pocas etapas más tarde, en el estado 9. El vapor es entonces expandido a través de la turbina hasta el estado 6, donde prevalece la presión del condensador. [14]

El condensador mostrado aquí es enfriado por aire, con el aire de refrigeración entrando en el condensador en el estado c1 y saliendo en el estado c2.

El pozo caliente del condensador está en la estación 7. El fluido es reinyectado en el estado 4. [14]

Las ecuaciones termodinámicas para el proceso de un ciclo de vapor rápido simple son válidas para modelar un ciclo de vapor rápido doble. La figura 6 muestra el proceso esquemático de un ciclo de doble flash. [14]

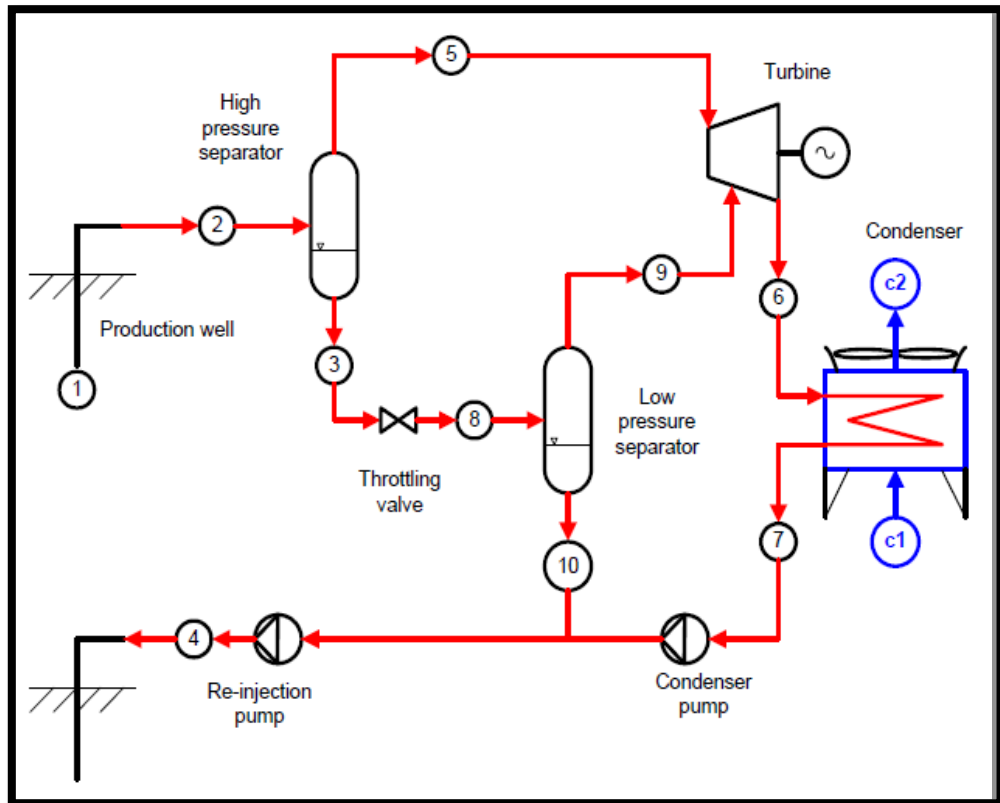


Fig. 6: Esquema del proceso del ciclo de vapor rápido doble.
Fuente: Geothermal Power Plant Cycles and Main Components

Con la finalidad de entender mejor el proceso de ciclo de vapor rápido doble es necesario recurrir a los diagramas termodinámicos de T-s y de T-h, las cuales se muestran en la Figura 7 y la Figura 8.

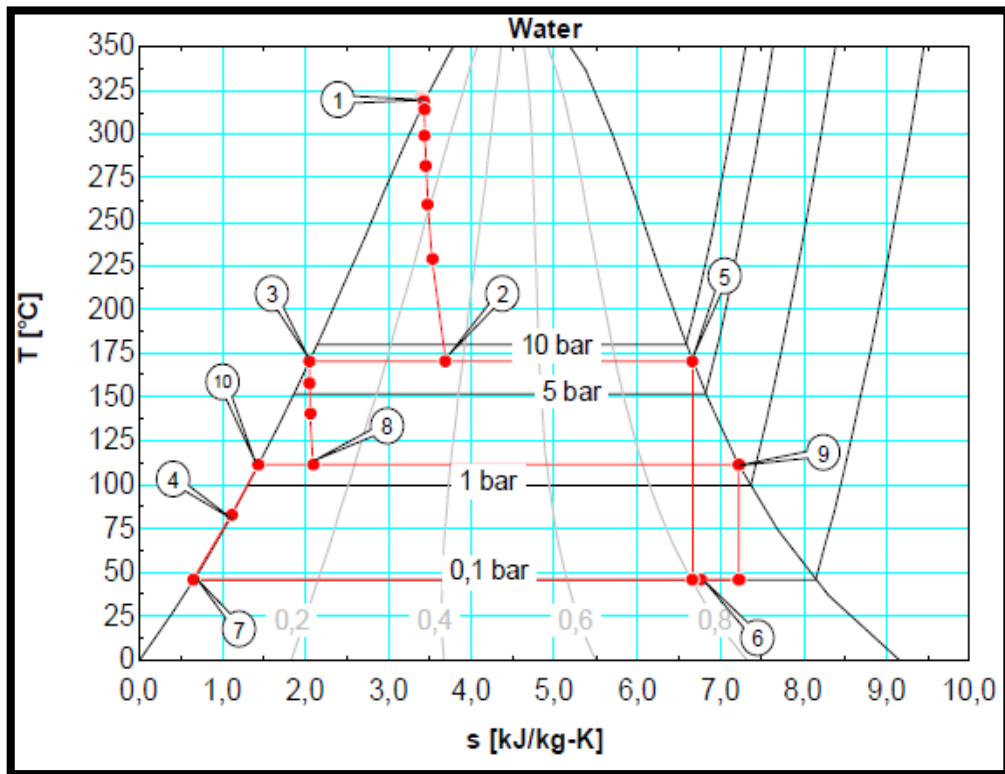


Fig. 7: Diagrama T-s de un ciclo de vapor rápido doble.
Fuente: Geothermal Power Plant Cycles and Main Components.

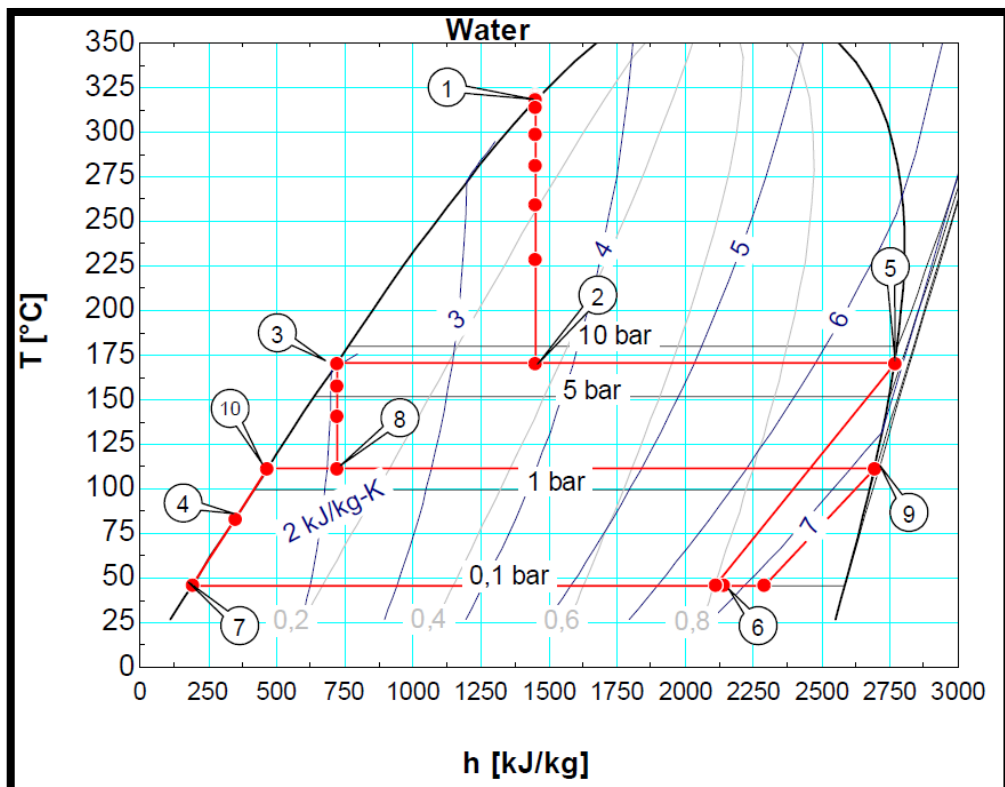


Fig. 8: Diagrama T-h de un ciclo de vapor rápido doble.
Fuente: Geothermal Power Plant Cycles and Main Components.

❖ CICLO BINARIO

Las centrales eléctricas de ciclo binario están desarrolladas para recursos geotérmicos bajos y medianos. Generalmente hay dos tipos de ciclos binarios los cuales son: El ciclo ORC (ciclo de Rankine orgánico) y Kalina; aunque este proyecto solo se tratara el ORC. [15]

El sistema ORC se diseña para operar con temperaturas de entrada en el rango de 85 a 180 °C, de acuerdo a una selección del fluido apropiado para el trabajo, este fluido es principalmente isobutano, o isopentano o la mezcla de ellos; en general, el isobutano da más potencia en comparación con el isopentano. El límite de temperatura superior está restringido por la estabilidad térmica de los fluidos binarios orgánicos (fluido de trabajo); el límite inferior de temperatura está principalmente restringido por consideraciones prácticas y económicas, en las cuales interviene el intercambiador de calor. [15]

El ORC cuenta con los siguientes componentes:

- Intercambiador de calor o evaporador: Aquí se realiza la transferencia de energía térmica entre dos fluidos, de los cuales uno tiende a perder energía térmica (se enfría) y el otro gana energía térmica (se calienta).
- Turbina: Es un motor rotativo que convierte la energía de una corriente de vapor de agua o gas en energía mecánica. Su elemento principal es el rotor, que cuenta con palas, colocados alrededor de su circunferencia, las cuales giran y hacen girar al rotor gracias a la fuerza tangencial que genera el fluido de trabajo. [16]
- Generador: Es una máquina que produce energía eléctrica por transformación de la energía mecánica.
- Condensador o Intercambiador de Calor.
- Torre de Enfriamiento: Es una estructura diseñado para rebajar la temperatura del agua de refrigeración utilizado en plantas de energía, refinerías de petróleo, plantas petroquímicas, plantas de procedimientos de gas natural.
- Bomba: Se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud. [16]

- Fuente de Calor: Es un sistema donde se genera gran cantidad de poder calorífico; para el ORC se trata de un intercambiador de calor en el cual los fluidos están separados por una pared sólida. [16]

Con estos siete componentes mencionados se desarrolla el proceso del ORC de la siguiente manera:

Inicia con el fluido geotérmico al salir del pozo (estado s1); sale a temperatura alta y con aumento de presión, luego se enfría en el evaporador, para después entrar a un precalentador y al final ser reinyectado al pozo en el estado s2. El fluido es frecuentemente agua blanda. Si la presión se mantiene suficientemente alto no se separarán gases no condensables del líquido, y de esa manera no será necesario una extracción de gas. [17]

El fluido de trabajo sale de la bomba en el estado 4, he ingresa al precalentador; donde el fluido de trabajo recibe el calor necesario para alcanzar su punto de ebullición, luego sale en el estado 5, en este estado del proceso existe un punto en el diagrama T-q en que la diferencia de temperatura entre el fluido geotérmico y el de trabajo es mínima y se conoce como punto de estricción o pinchpoint. [18] El vapor sale del evaporador en el estado 1 y entra en la turbina, luego sale de la turbina en el estado 2 para entrar en el condensador, en el estado 3 sale el fluido de trabajo del condensador en estado líquido saturado e ingresa a una bomba. [17]

El proceso ORC el cual ha sido descrito, se puede observar en el diagrama de flujo figura 9.

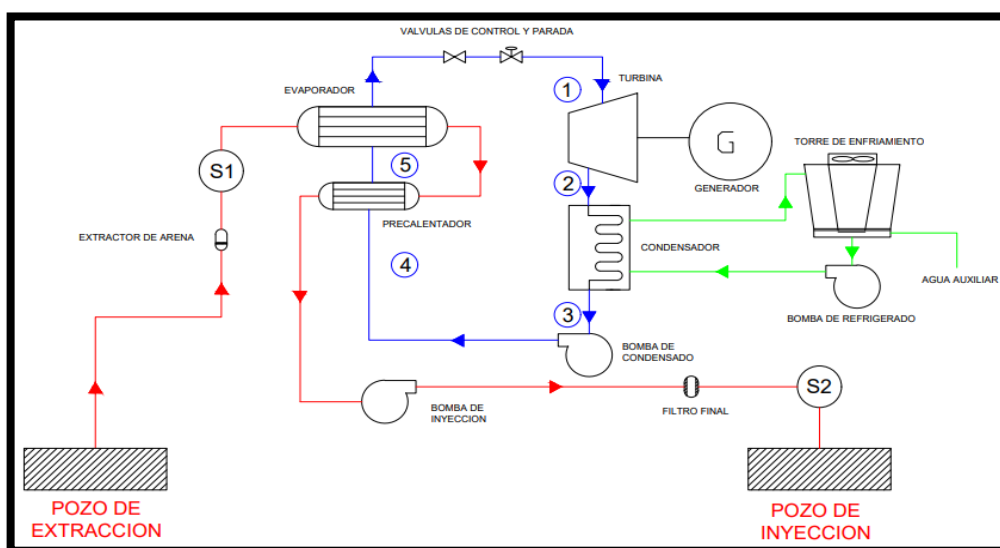


Fig. 9: Esquema simplificado de una central geotérmica de ciclo binario.
Fuente: Alberto Galante Marcos-UPC.

2.2.3 Análisis Termodinámico de los Componentes de un Ciclo Binario

Para realizar el análisis termodinámico de una central eléctrica geotérmica de ciclo binaria es necesario describir el diagrama T-s de un ciclo Rankine ideal la cual está formado de cuatro procesos:

- **Proceso 1-2:** Expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina. [18]
- **Proceso 2-3:** Transferencia de calor isobáricamente desde el fluido de trabajo hacia el fluido de refrigeración. [18]
- **Proceso 3-4:** Compresión isoentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba. [18]
- **Proceso 4-1:** Transferencia de calor isobáricamente hacia el fluido de trabajo a través de la fuente de calor. [18]

Para tratar las principales ecuaciones en el proceso del ORC se analizará cada estado:

- Estado 01

De propiedades del isobutano se obtiene la entalpía y la entropía a temperatura inicial en unidades de °C y presión inicial en unidades Bar. [18]

$$h_1 = h(P_1, T_1) [kJ/kg]$$

$$s_1 = s(P_1, T_1) [kJ/kg.K]$$

- Estado 02

Se sabe que este proceso es isoentrópico de acuerdo la segunda ley de la termodinámica por lo cual se hallara la entalpía 2 considerando la entropía 2 igual a la entropía 1 y a una presión de expansión en unidades bar. [18]

$$h_2 = h(P_2, T_2) [kJ/kg]$$

$$s_2 = s_1$$

Consecuentemente se determinara el valor de la entalpía h_{2r} con irreversibilidad mediante la siguiente ecuación considerando la eficiencia de la turbina. [18]

$$\eta_{TV} = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$h_{2r} = [h_1 - \eta_{TV}(h_1 - h_2)] [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (2)}$$

- Estado 03

Se determinara la entalpía h_3 de propiedades del isobutano a líquido saturado, y la densidad por la cual se obtiene el volumen específico a una determinada presión. [18]

$$h_3 = h(P_2, liq. sat.) [kJ/kg]$$

$$v_3 = v(P_2) [m^3/kg]$$

- Estado 04

Se determinara la entalpía h_4 mediante la siguiente ecuación considerando que $P_4 = P_1$ y $P_3 = P_2$. [18]

$$h_4 = h_3 + v_3(P_4 - P_3) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Se halla el estado real de la entalpía h_{4r} considerando la eficiencia de la bomba. [18]

$$\eta_B = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4r}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$h_{4r} = -\frac{h_3 - h_4}{\eta_B} + h_3 [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (5)}$$

Ahora se analizará cada componente del ORC

❖ **Turbina**

El vapor generado en la fuente de calor en el estado 1, con presión y temperatura elevadas, se expande a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el estado 2 a baja presión. [18]

$$W_T = (h_1 - h_{2r}) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\dot{P}_T = \dot{m}(h_1 - h_{2r}) [kJ/s \text{ ó } kW] \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde

W_T : Trabajo desarrollado en la turbina en unidades de $[kJ/kg]$.

\dot{m} : Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s].

\dot{P}_T : Potencia generada por la turbina en unidades de [kJ/s ó kW].

❖ Condensador

Se inicia en el estado 2, aquí se transfiere calor del vapor al agua que circula en un flujo separado. El vapor se condensa y la temperatura del agua de refrigeración aumenta. Y desemboca en el estado 3, el fluido de trabajo condensado. [18]

$$Q_c = (h_{2r} - h_3) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$\dot{P}_c = \dot{m}(h_{2r} - h_3) [kJ/s] \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde

Q_c : Calor cedido en el condensador en unidades de [kJ/kg].

\dot{m} : Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s].

\dot{P}_c : Potencia del condensador e unidades de [kJ/s ó kW].

❖ Bomba

El líquido procedente del condensador en el estado 3 es bombeado desde la presión más alta en el estado 4 antes de ingresar a la fuente de calor. [18]

$$W_B = (h_{4r} - h_3)[kJ/kg] \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$\dot{P}_B = \dot{m}(h_{4r} - h_3)[kJ/s] \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde

W_B : Trabajo consumido por la bomba en unidades de [kJ/kg].

\dot{m} : Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s].

\dot{P}_B : Potencia consumida por la bomba en unidades de [kJ/s ó kW].

❖ Fuente de Calor

Se usa un intercambiador de calor; que es un dispositivo para intercambiar el calor de un fluido a otro. Este inicia en el estado 4 y termina en el estado 1 dando paso a un nuevo ciclo. [18]

$$\dot{Q}_{IC}/\dot{m} = (h_1 - h_{4r}) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\dot{Q}_{IC} = \dot{m}(h_1 - h_{4r}) [kJ/s] \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde

\dot{Q}_{IC}/\dot{m} : Calor cedido en el intercambiador de calor en unidades de $[kJ/kg]$.

Q_{IC} : Potencia en el intercambiador de calor en unidades de $[kJ/s \text{ ó } kW]$.

❖ **Potencia Neta**

Es la fracción útil de energía que se desarrolla en el ciclo termodinámico, siendo la diferencia entre la potencia producida por la turbina y la potencia que consume la bomba. [18]

$$P_{neta} = P_T - P_B [kJ/s] \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde

P_{neta} : Potencia neta en unidades de $[kJ/s \text{ ó } kW]$.

❖ **Potencia Neta generada**

Es la potencia neta relacionada a la eficiencia mecánica η_M y la eficiencia de generación η_G el generador la cual se determina con la siguiente ecuación: [18]

$$P_{neta,G} = P_{neta} \cdot \eta_M \cdot \eta_G [kJ/s] \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde

$P_{neta,G}$: Potencia neta generada en unidades de $[kJ/s \text{ ó } kW]$.

η_M : Eficiencia de transmisión mecánica en unidades de %.

η_G : Eficiencia de Generación en unidades de %.

❖ **El Rendimiento Térmico de Planta**

Indica el porcentaje de energía recibida por el fluido de trabajo en el intercambiador de Calor. [18]

$$\eta_{planta} = \frac{\text{Potencia Generada}}{\text{Potencia Suministrada}}$$

$$\eta_{planta} = \frac{P_{TV}}{Q_{ic}} \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$\eta_{planta} = \frac{(h_1 - h_{2r})}{(h_1 - h_{4r})} \quad \text{Ecuación (17)}$$

2.2.4 Análisis del flujo másico del fluido de trabajo

Se deberá tener en cuenta que la potencia generada por la turbina depende directamente del flujo másico del fluido de trabajo, ya que el trabajo desarrollado por la turbina es constante. Por lo que se determinara el flujo másico de este mediante el siguiente balance de energía. [18]

$$\dot{m}_{f.geo} \cdot (h_{s1} - h_{s2}) = \dot{m}_{f.t} \cdot (h_1 - h_4) \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$\dot{m}_{f.geo} \cdot Cp_{f.geo} (T_{s1} - T_{s2}) = \dot{m}_{f.t} \cdot Cp_{f.t} (T_1 - T_4) \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde

Cp : Calor específico del fluido geotérmico y del fluido de trabajo [$kJ/kg \cdot K$].

T_1 : Temperatura inicial del fluido de trabajo en el ciclo cerrado, además de ser la misma con la que sale del intercambiador de calor en unidades de [K].

T_4 : Temperatura final del fluido de trabajo en el ciclo cerrado, además de ser la misma con la que entra al intercambiador de calor en unidades de [K].

T_{s1} : Temperatura de entrada del fluido geotermal al intercambiador de calor en unidades de [K].

T_{s2} : Temperatura de salida del fluido geotermal del intercambiador de calor en unidades de [K].

2.2.5 Cálculo de Temperatura de salida del fluido (geofluido y agua blanda)

Se considera el subsuelo como un intercambiador de calor en forma de "U" de longitud 2L de la cual solo se tomará L porque se despreciará la parte inferior de la "U" y la L del otro lado de la "U", en este intercambiador la presión es constante.

En la figura 10 se muestra el sistema de intercambio de calor.

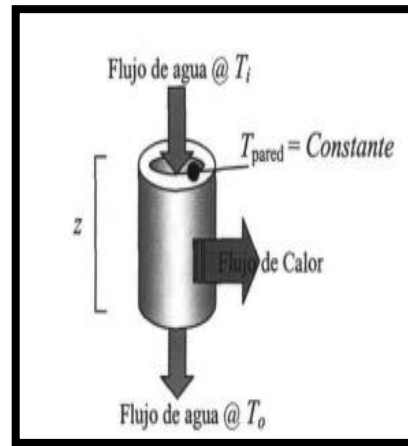


Fig. 10: Sistema de intercambio de calor.

Fuente: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Las ecuaciones que se presentan a continuación han sido seleccionadas de una tesis cuyo nombre es "Modelación de un Intercambiador de Calor Vertical Tipo "U" Utilizado en Sistemas de Enfriamiento Aprovechando el Frio del Subsuelo-Edición Única". [19]

- La temperatura de salida T_s sera:

$$T_s = T_{pared} + \left[(T_i - T_{pared}) \cdot e^{\left[\frac{-1}{Q \cdot \rho \cdot c_p \cdot R} \right]} \right] \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde

Q :Caudal [m^3/s].

ρ :Densidad del Agua blanda [kg/m^3].

C_p :Capacidad calorifica del Agua blanda [$kJ/kg \cdot K$].

R :Resistencia Termica [K/kW].

T_i :Temperatura de entrada del Agua blanda [K].

- Se sabe que la resistencia termica es igual a:

$$➤ R = R_i + R_{pared} + R_e \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde

$$R_{pared} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K_{material}}$$

$$R_i = \frac{1}{A_{interna} \cdot h_{Agua\ blanda}}$$

$$R_e = \frac{1}{A_{externa} \cdot h_{geofluido}}$$

A: Area del tubo

$$A_{interna} = 2\pi r_i Z; \quad Z = \text{longitud} = "L".$$

$$A_{externa} = 2\pi r_e Z; \quad Z = \text{longitud} = "L".$$

Donde

r_i : Radio interno del intercambiador vertical [m].

r_e : Radio externo del intercambiador vertical [m].

$h_{Agua\ blanda}$: Coeficiente de transferencia de calor del Agua blanda [kW/m².K].

$h_{geofluido}$: Coeficiente de transferencia de calor del geofluido [kW/m².K].

➤ Se sabe que U_i es igual:

$$\frac{1}{U_t} = \frac{1}{h_{Agua\ blanda}} + \frac{1}{h_{geofluido}} \quad \text{Ecuación (22)}$$

U_i : Coeficiente global de transferencia referida al area interna [kW/m².K].

➤ Para calcular el Numero de Nusselt primero se tiene que calcular el numero de Reynolds:

$$R_e = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde

v : Velocidad de entrada del Agua Blanda [m/s].

ρ : Densidad del Agua Blanda [kg/m³].

μ : Viscosidad Dinamica del Agua Blanda [kg/m. s].

➤ Para el N_u se sabe que el número de Prandtl (Pr) es:

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde

μ : Viscosidad Dinamica del Agua Blanda [$kg/m \cdot s$].

Cp : Capacidad Calorifica del Agua Blanda [$kJ/kg \cdot K$].

k : Conductividad Termica del Agua Blanda [$kW/m \cdot K$].

➤ De acuerdo al " R_e ":

a) $R_e < 2100$

$$N_u = 3,66 + \left[0,0668 \cdot \left(\frac{D_i}{Z} \right) \cdot \frac{R_e}{1 + 0,04 \left(\frac{D_i}{Z} R_e \right)^{\frac{2}{3}}} \right] \quad \text{Ecuación (25)}$$

b) $2100 < R_e < 10\ 000$

$$N_u = 0,116 \left(R_e^{\frac{2}{3}} - 1,25 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \left(\frac{D_i}{Z} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \quad \text{Ecuación (26)}$$

c) $10\ 000 < R_e$

$$N_u = 0,023 \cdot R_e^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad \text{Ecuación (27)}$$

➤ Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del Agua Blanda:

$$h_{\text{Agua blanda}} = \frac{K_{\text{Agua blanda}} \cdot N_u}{D_i} \quad [kW/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (28)}$$

Donde

N_u : Numero de Nusselt.

$K_{\text{Agua blanda}}$: Conductividad Termica del Agua Blanda [$kW/m \cdot K$].

D_i : Diametro interno del intercambiador $D_i = 2r_i$ [m].

- Después se calcula el caudal del agua blanda que entrara en la tubería:

$$Q = A \cdot V \text{ [m}^3\text{/s]} \quad \text{Ecuación (29)}$$

- Además se calcula el flujo masico de agua blanda en la entrada:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \text{ [kg/s]} \quad \text{Ecuación (30)}$$

Cuando se conoce todas las variables termodinamicas e hidrodinamicas, se reemplaza y se calcula el T_s del agua blanda.

2.2.6 Cálculo del volumen y costo del Agua Blanda

Se considera el intercambiador de calor entre suelo-Geofluido-agua blanda como una tubería vertical de radio constante (Intercambiador vertical tipo U), en el cual solo se considerará un lado del intercambiador donde se tomará una longitud de 3000 metro, por lo tanto, el volumen equivalente es:

$$V_{\text{agua blanda}} = \pi \cdot r^2 \cdot z \text{ [m}^3\text{]} \quad \text{Ecuación (31)}$$

Este volumen corresponde a un solo ramal; si se tiene en cuenta la forma de un intercambiador tipo U, se puede apreciar que, si el agua blanda es trasladada del lazo izquierdo al derecho y viceversa, siempre quedará un vacío el cual disminuirá la eficiencia del sistema de transferencia de calor, por lo tanto, se debe de considerar una columna de agua en el ramal paralelo (izquierda-derecha) del sistema. Por otra parte, queda pendiente el cambio de dirección o la U del intercambiador, para ello se considera que el volumen de agua correspondiente a esa porción equivale al volumen sin efecto del radio hidráulico del ducto, es decir, el fluido nunca pasa por el ducto al 100% de su volumen, siempre mantiene un porcentaje libre el cual evita la cavitación y el golpe de ariete al descenso del fluido.

$$V_{\text{Total agua blanda}} = 2 \cdot V_{\text{agua blanda}} \text{ [m}^3\text{]} \quad \text{Ecuación (32)}$$

El volumen del tanque del agua blanda es:

$$V_{\text{Tanque del agua blanda}} = V_{\text{Total agua blanda}} \cdot 1,4 \quad \text{Ecuación (33)}$$

Sabiendo que el metro cubico de agua blanda está a S/.74,20 Nuevos soles, estimamos el gasto a realizar por la compra de dicho insumo con un 30% adicional.

$$Costo_{\text{Agua blanda}} = S/.74,20 \cdot (V_{\text{Total agua blanda}} * 1,3) \quad \text{Ecuación (34)}$$

2.2.7 Análisis físico y dinámico de la transferencia de calor entre el geo fluido y agua blanda

Las ecuaciones que se presentarán a continuación han sido seleccionadas del libro "Transferencia de Calor y Masa", de Yunus A.Cengel. [20]

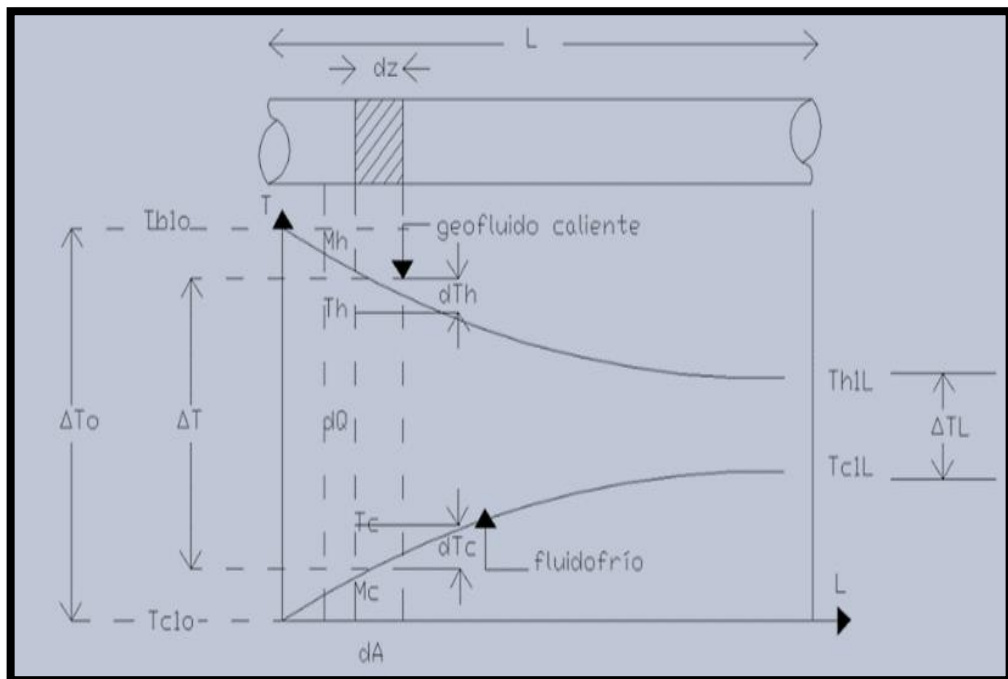


Fig. 11: Grafica del paso del fluido a través del tubo en el subsuelo.

Fuente: Elaboración Propia

Donde

A : Área de transferencia [m^2].

\dot{m}_h, \dot{m}_c : Variación másica del fluido caliente (geo fluido), fluido frío (agua blanda) [kg/s].

$\Delta T = T_h - T_c$: Diferencia de temperaturas en el interior [K].

$\Delta T_o = T_{ho} - T_{co}$: Diferencia de temperaturas para la posición $x=0$ [K].

$\Delta T_L = T_{hL} - T_{cL}$: Diferencia de temperaturas para la posición $Z=L$ [K].

U : Coeficiente de transferencia de calor global y local entre los fluidos [$kW/m^2 \cdot K$].

Q : Tasa de transferencia de calor global y local [kJ/s ó kW].

Para el cálculo de cantidad de calor que se transfiere es necesario que se analice la ecuación de transferencia de calor de acuerdo a la ley de Newton del enfriamiento:

$$dQ = U \cdot dA \cdot \Delta T \text{ [kJ/s ó kW]} \quad \text{Ecuación (35)}$$

Cuando el sistema sólo comprende transferencia de calor y ninguna interacción de trabajo cruza su frontera, la relación del balance de energía se reduce todavía más hasta el punto de la derivación

$$dQ = -\dot{m}_h \cdot C_{p_h} \cdot dT_h \text{ [kJ/s ó kW]} \text{ (geofluido)}$$

$$dQ = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot dT_c \text{ [kJ/s ó kW]} \text{ (agua tratada)}$$

Donde

C_{p_h} y C_{p_c} : calores específicos del geofluido y del agua tratada.

Después se desarrollara la variación de temperaturas reemplazando la variación de la transferencia de calor del balance de energía:

$$\Delta T = T_h - T_c$$

$$d(\Delta T) = d(T_h - T_c)$$

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

$$dQ = -\dot{m}_h \cdot C_{p_h} \cdot dT_h \rightarrow dT_h = \frac{-dQ}{\dot{m}_h \cdot C_{p_h}}$$

$$dQ = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot dT_c \rightarrow dT_c = \frac{dQ}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}}$$

$$d(\Delta T) = \frac{-dQ}{\dot{m}_h \cdot C_{p_h}} - \frac{dQ}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}}$$

$$d(\Delta T) = -dQ \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_{p_h}} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} \right) \text{ [K]} \quad \text{Ecuación (36)}$$

Luego se reemplazara la ecuación (31) en la ecuación (32):

$$dQ = U \cdot dA \cdot \Delta T$$

$$d(\Delta T) = -dQ \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot C_{p_h}} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} \right)$$

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right) U \cdot dA \quad \text{Ecuación (37)}$$

La Ecuación (33) se integra entre los parametros de $Z=[0, L]$:

$$\int_{\Delta T_0}^{\Delta T_L} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\int_0^{A_T} \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right) U \cdot dA$$

$$[\ln(\Delta T_L) - \ln(\Delta T_0)] = -\left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right) U(A_T - 0)$$

$$\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0}\right] = -\left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right) U \cdot A_T \quad \text{Ecuación (38)}$$

La tasa de variación de temperatura la cual es la ecuación (32) se integrara de acuerdo a los siguientes parametros: Para $Z \in [0, L]$, $\Delta T \in [\Delta T_0, \Delta T_L]$, $Q \in [0, Q]$.

$$d(\Delta T) = -dQ \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right)$$

$$\int_{\Delta T_0}^{\Delta T_L} d(\Delta T) = -\int_0^Q \left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right) dQ$$

$$\Delta T_0 - \Delta T_L = \left[\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right] Q$$

$$\left[\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right] = \left[\frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{Q}\right] [K \cdot s / kJ] \quad \text{Ecuación (39)}$$

Se sustituye la ecuación (35) en la ecuación (34):

$$\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0}\right] = -\left(\frac{1}{\dot{m}_h \cdot Cp_h} + \frac{1}{\dot{m}_c \cdot Cp_c}\right) U \cdot A_T$$

$$\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0}\right] = -\left(\frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{Q}\right) U \cdot A_T$$

$$Q = \left[\frac{\Delta T_L - \Delta T_0}{\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0}\right]}\right] U \cdot A_T [kJ/s \text{ ó } kW] \quad \text{Ecuación (40)}$$

Ahora se calculara el área de trabajo para la transferencia de calor; partiendo de la transferencia por conducción.

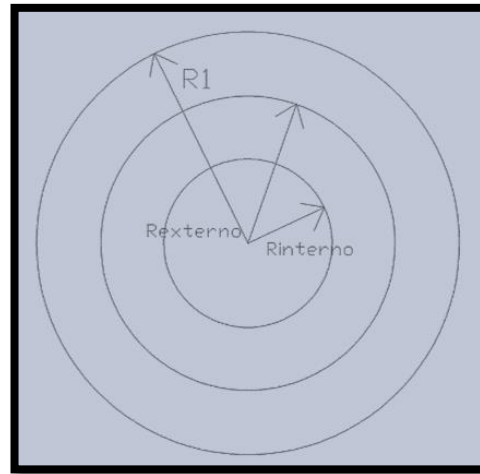


Fig. 12: Vista planta del tubo
Fuente: Elaboración Propia

$$Q = -AK \frac{dT}{dr} \rightarrow Q = \frac{dT}{\left(-\frac{dr}{AK}\right)} \quad \text{Ecuación (41)}$$

Se genera una gaussiana interna con radio r^l que va desde r_i a r_e , $Z=L$ (largo del tubo), se integrara la ecuación (36) de acuerdo a los anteriores parametros:

$$\begin{aligned} Q &= -(2\pi r^l Z) K \frac{dT}{dr^l} \\ - \int_{r_i}^{r_e} \left(\frac{Q}{2\pi Z} \right) \frac{dr^l}{r^l} &= \int_{T_i}^{T_e} K dT \\ - \frac{Q}{2\pi Z} (\ln(r_e) - \ln(r_i)) &= K(T_e - T_i) \\ Q &= \frac{2\pi Z K (T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad \text{Ecuación (42)} \end{aligned}$$

A la ecuación (38) se multiplicara por $\left(\frac{r_e - r_i}{r_e - r_i}\right)$ Obteniendo:

$$Q = \frac{K(T_i - T_e)}{(r_e - r_i)} \times \frac{2\pi Z (r_e - r_i)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad \text{Ecuación (43)}$$

La Diferencia Logarítmica Media del Área es: $\frac{2\pi Z (r_e - r_i)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}$

Se Concluye que el área total es igual a la diferencial logaritmica media del área.

Finalmente la expresión para la transferencia de calor queda:

$$Q = \left[\frac{\Delta T_L - \Delta T_0}{\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0} \right]} \right] U \cdot A_T$$

$$Q = \left[\frac{\Delta T_L - \Delta T_0}{\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0} \right]} \right] \cdot U_G \cdot \left[\frac{2\pi Z (r_e - r_i)}{\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right)} \right]$$

$$Q = \left[\frac{\Delta T_L - \Delta T_0}{\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0} \right]} \right] \cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{h_{\text{Agua blanda}}} + \frac{1}{h_{\text{geofluido}}}} \right] \cdot \left[\frac{2\pi Z (r_e - r_i)}{\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right)} \right] \quad \text{Ecuación (44)}$$

$$\cdot \left[\frac{2\pi Z (r_e - r_i)}{\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right)} \right] \quad [\text{kJ/s ó kW}]$$

Donde

$$\Delta T_o = T_{ho} - T_{co}$$

$$\Delta T_L = T_{hL} - T_{cL}$$

$$Z = L$$

2.2.8 Cálculo para la selección del intercambiador de calor

Las ecuaciones que se presentaran a continuación han sido seleccionadas del paper "INTERCAMBIADORES DE CALOR", de O. A. Jaramillo, Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México Noviembre 20 del 2007. [21]

La ecuación del balance de energía para un intercambiador de calor es:

$$Q_{entregado} = Q_{cedido} + \text{Perdidas} \quad [\text{kJ/s ó kW}] \quad \text{Ecuación (45)}$$

Se sabe que :

$$Q_{cedido} = U_o \cdot A_o \cdot MTD \quad [\text{kJ/s ó kW}] \quad \text{Ecuación (46)}$$

Para la selección del intercambiador de calor es necesario saber el área de la carcasa, para lo cual se utiliza la ecuación (43) de la siguiente manera:

$$A_o = \frac{Q_{cedido}}{U_o \cdot MTD} [m^2] \quad \text{Ecuación (47)}$$

Donde

Q_{cedido} : Calor sedido en el intercambiador [kJ/s ó kW].

MTD : Diferencia de temperatura media corregida [K].

U_o : Coeficiente de transferencia de calor [kW/m².K].

Cuando se desea que la temperatura de salida del fluido secundario que se calienta sea mayor a la temperatura de salida del fluido primario que se enfria; se utiliza intercambiadores de calor de contraflujo con varias celdas en serie lo cual significa que el calor que se usa en el intercambiador se divide en el numero de celdas en serie; para esta tesis se utilizara dos celdas en serie.

➤ Diferencia de temperatura media corregida:

La diferencia media de temperatura (MTD) en un intercambiador de calor de casco y tubo es la diferencia media logarítmica de temperaturas (LMTD) multiplicado por un factor (F).

$$MTD = F \cdot LMTD [K] \quad \text{Ecuación (48)}$$

Dónde

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} [K] \quad \text{Ecuación (49)}$$

Teniendo en cuenta que:

T: Temperatura fluido caliente.

t: Temperatura fluido frio.

1: Entrada.

2: Salida.

El factor F se obtiene de gráficas, de acuerdo a los valores calculados en "P" y en "R".

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{Ecuación (50)}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{Ecuación (51)}$$

➤ Coeficientes de transferencia de calor:

El coeficiente global de transmisión de calor combina todas las resistencias al flujo calorífico. Todas deben basarse en el área exterior.

$$\frac{1}{U_o} = r_{io} + r_{dio} + r_{mo} + r_{do} + r_o \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}] \quad \text{Ecuación (52)}$$

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_{io}} + r_{di} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot K_m} + r_{do} + \frac{1}{h_o} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}] \quad \text{Ecuación (53)}$$

Donde

r_{io} : Resistencia de película interna $= \frac{1}{h_{io}}$

r_{dio} : Resistencia de suciedad interna.

r_{mo} : Resistencia de la parte metálica.

r_{do} : Resistencia de suciedad externa.

r_o : Resistencia de película externa $= \frac{1}{h_o}$

h : Coeficiente de película de transmisión de calor.

d_i : Diámetro interno.

d_o : Diámetro externo.

K_m : Conductividad térmica del material.

➤ Número de tubos en el intercambiador:

Por último se halla el número de tubos.

$$N_t = \frac{A_o}{\pi D_{ext} L} \quad \text{Ecuación (54)}$$

2.2.9 Cálculo del volumen y costo del Isobutano

Se tiene en cuenta que en el intercambiador se encuentra un serpentín de ductos paralelos a contracorriente con el agua blanda calentada, así mismo, en la distribución del serpentín se encuentran las curvaturas de conducción entre ducto y ducto.

El volumen de las tuberías es:

$$V_{tuberias} = Area\ efectiva \cdot longitud\ del\ ducto\ [m^3] \quad \text{Ecuación (55)}$$

Luego, para hallar el volumen del Isobutano se utiliza la siguiente formula:

$$V_{isob} = N_t \cdot V_{tuberias} [m^3] \quad \text{Ecuación (56)}$$

Después, se halla el volumen total del Isobutano que es igual al volumen del Isobutano por número de celdas en serie.

$$V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} = V_{isob} * 2 [m^3] \quad \text{Ecuación (57)}$$

Para hallar el volumen del tanque se utiliza la siguiente formula:

$$\begin{aligned} V_{Tanque\ del\ Isobutano} & \quad \text{Ecuación (58)} \\ & = V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} \cdot 1,4 [m^3] \end{aligned}$$

De la cotización realizada para estimar el costo del Isobutano se obtuvo el siguiente resultado:

$$1\ m^3_{isobutano} = S/.144,87$$

Sabiendo el costo del Isobutano por metro cubico podemos hallar el costo total del Isobutano que se usa en la central más un 30% en la siguiente formula:

$$\begin{aligned} costo_{isobutano} & = S/.144,87 * (V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} \\ & \quad * 1,3) \quad \text{Ecuación (59)} \end{aligned}$$

2.2.10 Cálculo para la selección del generador

El alternador de una central que estará acoplado a la turbina, usualmente es de tipo síncrono ya que son los indicados para potencias mayores a 2 MW, y con 2 pares de polos para 1800 rpm y a una frecuencia del sistema de 60 Hz.

Para seleccionar el generador se debe calcular la intensidad nominal del sistema la cual se podrá calcular con la ecuación de la potencia activa:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi [kW] \quad \text{Ecuación (60)}$$

Dónde

P = Potencia nominal de la planta kW.

U = Tensión nominal expresada en kV.

I = Corriente nominal, expresada en kA.

Cos φ = Factor de potencia.

2.2.11 Cálculo de dimensión de tubería

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} [m] \quad \text{Ecuación (61)}$$

Dónde

d = Diámetro de la tubería [m].

Q = Caudal [m^3/s].

V = Velocidad [m/s].

2.2.12 Cálculo de dimensión de Tubería a partir de datos de la bomba

Primero se halla el caudal " Q " [m^3/s] con la siguiente ecuación, debido a que se conoce la eficiencia " η " de 87%, la presión de salida " P " [Pa] y la potencia hidráulica " P_H ".

$$P_H = \frac{P \cdot Q}{\eta} [J/s] \quad \text{Ecuación (62)}$$

Luego se halla el área de la tubería a través de la ecuación 29 y al final se calcula el diámetro con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [m^2] \quad \text{Ecuación (63)}$$

2.2.13

Cálculo del espesor del aislamiento térmico

Primero se debe calcular el coeficiente de convección externa:

- Para un flujo laminar cuando:

$$\text{Diámetro de la tubería}^3 \cdot (T_{interior} - T_{ambiente}) \leq 10 [m^3 \cdot K].$$

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(T_{interior} - T_{ambiente})}{\text{Diámetro de la tubería}}} [W/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (64)}$$

- Para un flujo turbulento cuando:

$$\text{Diámetro de la tubería}^3 \cdot (T_{interior} - T_{ambiente}) > 10 [m^3 \cdot K].$$

$$h_{convección} = 1,21 \sqrt[3]{(T_{interior} - T_{ambiente})} [W/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (65)}$$

Luego se calcula el coeficiente de radiación externa utilizando la siguiente fórmula:

$$h_{radiación} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (TK_{sup} + TK_{aire})(TK_{sup}^2 + TK_{aire}^2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

$$[W/m^2 \cdot K]$$

Dónde

ε = Coeficiente de emisión de la superficie en estudio. 0,25 para metálica opaca.

σ = Constante de Stefan-Boltzman $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$.

TK_{sup} = Temperatura del fluido dentro del tubo [K].

TK_{aire} = Temperatura del aire o ambiente [K].

Con el coeficiente de convección y de radiación se puede calcular la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico " $q_{L.R}$ ".

$$q_{L.R} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{interno} \cdot h_{interno}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interno}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{del\ metal}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{exterior} \cdot h_{exterior}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

$$[W/m]$$

Dónde

$T_{externa}$ = Temperatura del ambiente [K].

$T_{interna}$ = Temperatura del interior de la tubería [K].

$r_{exterior}$ = Radio de la tubería [m].

$r_{interno}$ = Radio de la tubería sin espesor [m].

$k_{del\ metal}$ = Coeficiente de Conductividad [$W/m \cdot K$].

$h_{exterior}$ = $h_{convección} + h_{radiación}$ [$W/m^2 \cdot K$].

Hallando " $q_{L.R}$ " se calculara la Densidad de flujo de calor " q ":

$$q = \frac{q_{L.R}}{\pi \cdot D_a} [W/m^2] \quad \text{Ecuación (68)}$$

Después de encontrar el valor de " q " podemos hallar el valor de λ_B con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

Dónde

D_a = Diámetro exterior [m].

D_i = Diámetro interior [m].

$q_{L,R}$ = Densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico [W/m].

θ_M = Temperatura del medio [K].

θ_L = Temperatura ambiente [K].

q = Densidad de flujo de calor [W/m²].

h_i = Coeficiente de transferencia de calor en interior [W/m².K].

h_a = Coeficiente de transferencia de calor en exterior [W/m².K]. este valor es igual a $h_{exterior}$.

Finalmente con λ_B podemos calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

Dónde

d = Espesor del aislamiento [m].

λ_B = Conductividad térmica operacional del aislamiento [W/m.K].

2.2.14 Criterios para la Evaluación Económica

La evaluación económica tiene por objetivo analizar la viabilidad económica de una central de ciclo binario usando los siguientes criterios:

- Se considerará una central despachada en base
- Como caso base se considera un horizonte de evaluación de 20 años.
- La evaluación económica se realiza según el valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de retorno de la inversión (PRI), considerando una tasa de descuento de 10 %.
- Las cifras serán calculadas en dólares.

➤ Costo de Generación del kW.h:

Se calcula mediante el LCOE que es el coste teórico de generar energía eléctrica, incluye la inversión inicial, tasa de descuento, así como los costes de mantenimiento y operación. La fórmula para analizarlo es la siguiente la cual

ha sido escogida de "Assessing the Economic Value of New Utility-Scale Renewable Generation Projects". EIA Energy Conference, 2013.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{i + Mt}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E}{(1+r)^t}} \quad \text{Ecuación (71)}$$

Donde

t = Vida estimada de la Instalación.

i = Inversión Inicial.

Mt = Costes de operación y mantenimiento.

E = Energía generada durante la vida del sistema.

r = Tasa de descuento.

➤ Valor Actual Neto (VAN):

Primero se debe realizar un flujo de caja, después al realizar el cálculo del VAN se considerarán las entradas y los desembolsos que se observan en el flujo de caja, considerando la entrada positiva y los desembolsos negativos.

$$VAN = -INV + \sum_1^{n=20} \frac{Fj}{(1+r)^n} \quad \text{Ecuación (72)}$$

Donde

INV : Inversión total del proyecto en dólares.

Fj : Resultado de la resta de las entradas y los desembolsos.

n : Tiempo de duración del proyecto.

r : Tasa de interés.

➤ Tasa Interna de Retorno (TIR):

Es la tasa de interés ganada sobre el saldo no recuperado de una inversión. El procedimiento general empleado para calcular una tasa de retorno es el siguiente:

- Trazar un diagrama de flujo despachada en base.
- Plantear la ecuación de la tasa de retorno de la forma siguiente:

$$0 = -VP_E + VP_I \quad \text{Ecuación (73)}$$

III. Metodología

3.1 Analizar la situación actual de la generación y transmisión de energía eléctrica en el Perú

A través de los últimos años el país ha incrementado la producción de su energía eléctrica gracias a nuevas plantas de generación. Esta energía es transmitida a través del SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) la cual cubre el 85% de energía a la población. Actualmente se planea la implementación de nuevas centrales de generación de energía a partir de fuentes renovables y la ampliación del SEIN sobre todo en las áreas del sur donde se abrirán nuevas empresas mineras aumentando la demanda de energía gracias al aumento de la población causado por la oferta de trabajo que generara las minas. [22]

La capacidad de generación instalada en la red del SEIN se utiliza para satisfacer la necesidad de capacidad máxima de la población e industrias en general; además proporciona un margen adecuado de reserva la cual cubre la capacidad instalada que se encuentre por en sima de la capacidad máxima causadas por condiciones de suministros inesperados, como cambios extremos de clima o adiciones inesperadas de nuevas cargas. [18]

Si bien es cierto que la demanda energética va en aumento; el crecimiento de la matriz energética no se queda atrás por ello el MINEN está promoviendo la inversión en nuevos proyectos de generación de energía eléctrica con el DECRETO LEGISLATIVO N° 1002 (promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables), por este motivo se está realizando el dimensionamiento de una central geotérmica en el sur del país que pueda inyectar energía eléctrica al SEIN, satisfacer la futura demanda y aumentar las reservas de energía. [23]

Para realizar este proyecto se debe efectuar un estudio de la distribución del SEIN, analizar el incremento de energía eléctrica, demanda anual, producción de energía eléctrica de centrales eléctricas, de costo marginal y también el incremento de la potencia generada durante los años 2014 y 2016 a nivel nacional y luego específicamente en la región de Moquegua donde se determinará la zona de instalación de la central geotérmica. El SEIN cuenta con líneas de transmisión de 550 kV, 220 kV, 138kV, 66 kV, 50 kV y 33 kV. En el 2014 el SEIN contaba con 44 empresas con unas 98 centrales que formaban parte de la generación, la cual aumentado para el 2016 a 52 empresas con 105 centrales. [24]

Entre estas centrales se tiene las de energías renovables y las no renovables siendo especificadas en cantidad en el cuadro 2.

Cuadro 2: Comparación entre cantidades de centrales de los periodos 2014 y 2016

TIPO DE CENTRAL	NUMERO DE CENTRALES	NUMERO DE CENTRALES
	2014	2015
HIDROELECTRICA	54	61
TERMICA	36	35
SOLAR	5	5
EÓLICA	3	4
NUCLEAR	0	0

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional

Gracias al incremento de centrales en el SEIN se ha incrementado la dimensión de las líneas de transmisión en longitud (km); el cual actualmente se puede observar en la figura 13.

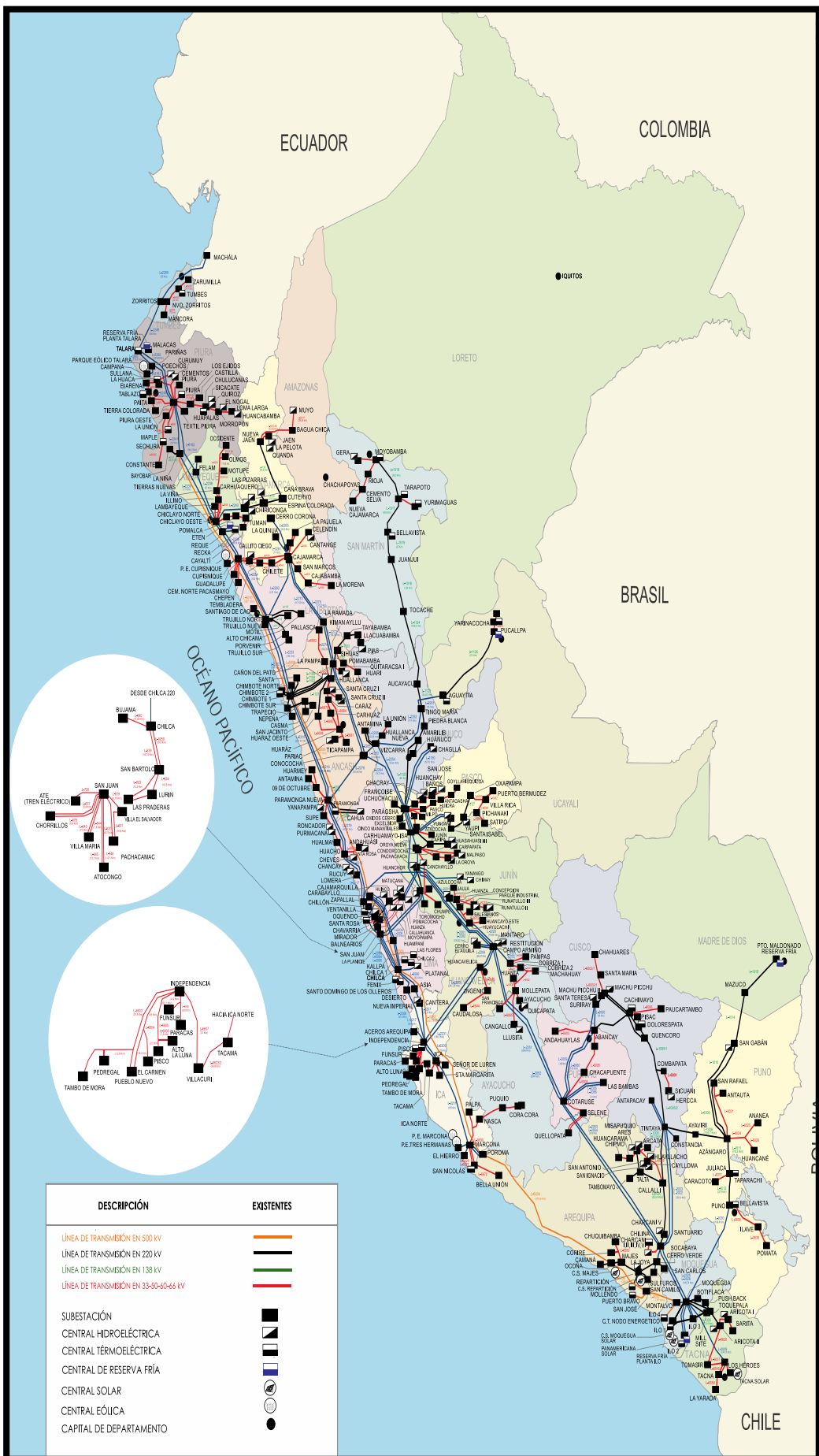


Fig.13: Sistema Eléctrico Interconectado Nacional Diciembre 2016.
Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.

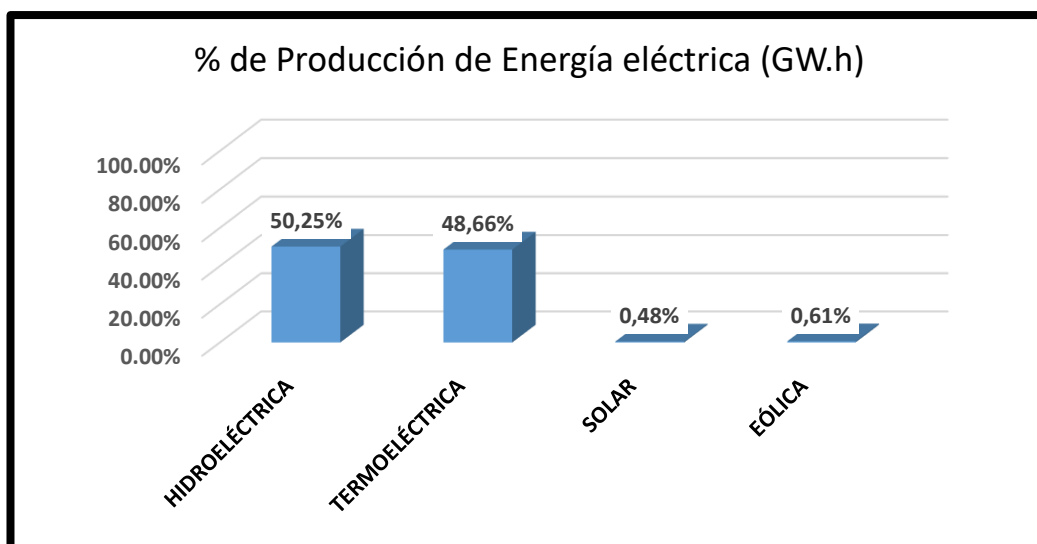
Ahora se presentará el estudio que ha realizado el COES (Comité de Operaciones del Sistema Interconectado Nacional) en el año 2014 donde se expondrá la información de la generación de energía eléctrica por tipo de tecnología, la demanda de cada recurso y el costo marginal según cada zona geográfica correspondiente a las áreas Norte, Centro y Sur del país.

Respecto a la generación de energía eléctrica se registró que fue de 41 795,9 GW.h entre hidroeléctrica, termoeléctrica, solar y eólica; un 7,83 % corresponde al abastecimiento efectuado en las centrales ubicadas en el área norte, 85,42% en el área centro y 6,75 % en el área sur; cuyos datos se pueden observar en el siguiente cuadro 3 y siguientes gráficas de porcentajes 2 y 3. [25]

Cuadro 3: Producción de energía eléctrica (GW.h) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2014

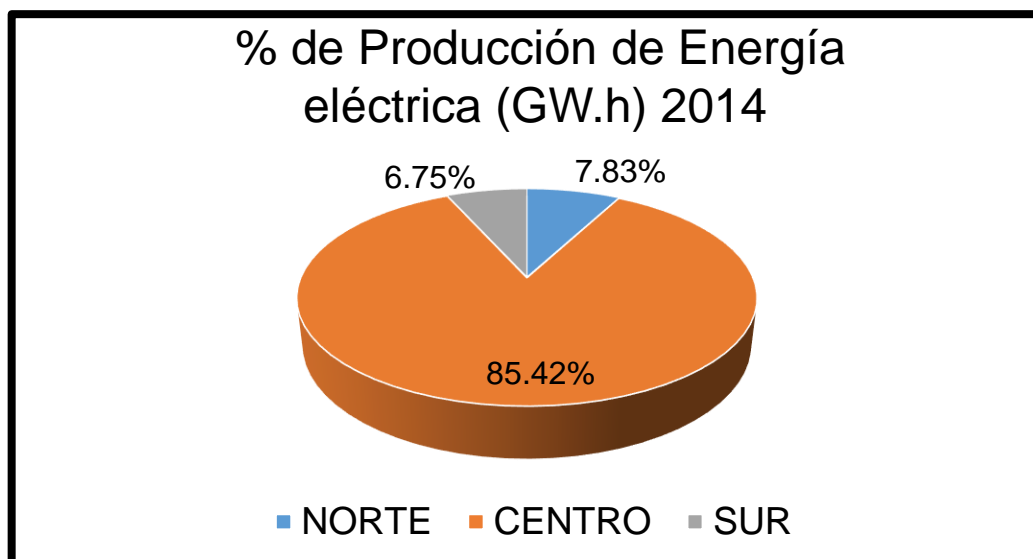
ÁREA	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (GW.h)				
	HIDROELÉCTRICA	TERMOELÉCTRICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL
NORTE	2506.10	588.90	0.00	176.70	3271.70
CENTRO	16099.80	19524.00	0.00	79.60	35703.40
SUR	2397.00	224.50	199.30	0.00	2820.80
TOTAL COES	21002.90	20337.40	199.30	256.30	41795.90

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.



Grafica 2: Producción de energía eléctrica (GW.h) en porcentaje de acuerdo al uso de los diferentes tipos de recursos convencionales y no convencionales.

Fuente: Elaboración Propia.



Grafica 3: Producción de energía eléctrica (GW.h) 2014 en porcentaje de acuerdo a las diferentes áreas: Norte, Centro, Sur.

Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a la máxima demanda anual de potencia para el periodo 2014, fue registrada en el siguiente cuadro 4, donde se observó que se alcanzó los 5 737,27 MW como máxima demanda, satisfecha en 10,93% por centrales del norte, un 82,02% en centrales del centro, y un 7,05% en centrales del sur; aunque durante el año 2014 se efectuaron retiros de operaciones comerciales como el de la unidad TV2 de la central termoeléctrica Ilo1, con 22 MW (30 de mayo), la unidad TG1 de la central termoeléctrica Malacas con 11,7 MW (23 de agosto); retiro de la C.T. de Chimbote con 19,6 MW (01 de setiembre), C.T. de Chiclayo con 9,6 MW (01 de setiembre) y C.T. Piura con 26,1 MW (01 de setiembre). [25]

Cuadro 4: Máxima Demanda (MW) del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2014

ÁREA	MÁXIMA DEMANDA (MW)					
	HIDROELÉCTRICA	TERMOELÉCTRICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL	%
NORTE	436.84	110.52	0.00	79.67	627.02	10.93%
CENTRO	2223.55	2469.04	0.00	13.10	4705.68	82.02%
SUR	404.57	0.00	0.00	0.00	404.57	7.05%
TOTAL COE	3064.95	2579.55	0.00	92.77	5737.27	100.00%

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.

El 31 de diciembre se alcanzó la máxima potencia efectiva de 8717,8 MW, como se observa en el cuadro 5: En la cual C. Hidroeléctricas obtuvieron un 37,9%, en la C. Termoeléctricas un 59,23%, también en la C. Eólicas un 1,10% y además en la C. Solare 1,67%. [25]

Cuadro 5: Potencia Efectiva (MW) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2014

AREA	POTENCIA EFECTIVA A DICIEMBRE 2014 (MW)				
	HIDROELÉCTRICA	TERMOELÉCTRICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL
NORTE	473,0	369,5	0,0	114,0	956,4
CENTRO	2412,1	3926,1	0,0	32,0	6370,1
SUR	427,2	868,0	96,0	0,0	1391,2
TOTAL	3312,2	5163,5	96,0	146,0	8717,8

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.

De acuerdo con los cuadros de potencia efectiva y de máxima demanda de potencia; se observa que la máxima demanda fue el 65,8% de la potencia eficaz que género en total todas las energías renovables y no renovables de las áreas (norte, centro y sur), concluyendo que en el año 2014 hubo una sobre generación de potencia eficaz lo cual causó un exceso de consumo de materia prima innecesaria produciendo una variación en el costo marginal.

El costo marginal del SEIN se evalúa mensual y anualmente y es comparado con el precio de venta en la barra, para ello se toma como referencia la barra Santa Rosa. Para el periodo 2014 se puede observar que el mes de marzo tuvo el valor más alto en precio de barra y costo marginal, además es notable que el promedio anual de costo marginal es de 24,56 US\$/MW.h (cuadro 6).

Cuadro 6: Costo Marginal Promedio del SEIN (US\$/MW.h) y Tarifa de Energía del año 2014

Mes-Año	Costo Marginal Mensual del SEIN			Tarifa de Barra
	Tipo de Cambio	Mensual (\$/MWh)	Prom. Anual (\$/MWh)	Mensual (\$/MWh)
Enero-14	2,82	21,39	24,56	39,80
Febrero-14	2,81	29,85	24,56	43,76
Marzo-14	2,81	34,31	24,56	44,23
Abril-14	2,81	28,10	24,56	44,07
Mayo-14	2,77	25,42	24,56	40,77
Junio-14	2,80	30,96	24,56	39,91
Julio-14	2,80	24,91	24,56	39,70
Agosto-14	2,85	27,42	24,56	39,23
Septiembre-14	2,89	23,86	24,56	38,62
Octubre-14	2,92	17,97	24,56	40,26
Noviembre-14	2,92	23,45	24,56	36,65
Diciembre-14	2,99	15,16	24,56	35,76

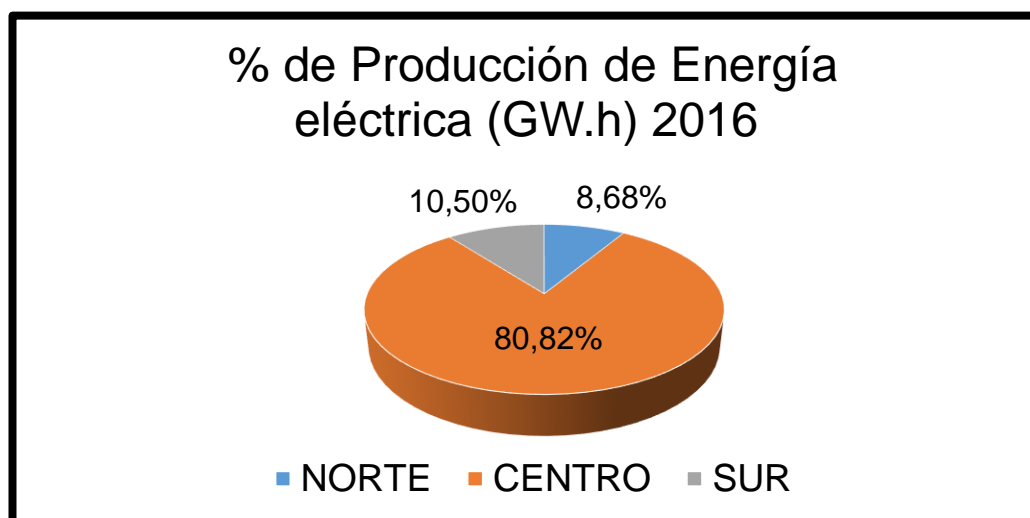
Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.

Siguiendo con la presentación del estudio del COES, durante el periodo 2016 la energía generada fue de 48 326,4 GW.h, la cual fue producido por centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, solares y eólicas; separadas en áreas: Norte con un 8,68%, Centro con un 80,82% y Sur un 10,5% de producción de energía, el cual se podrá observar en el siguiente cuadro 7 y en la gráfica 5 de porcentajes. [26]

Cuadro 7: Producción de energía eléctrica (GW.h) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2016

ÁREA	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA 2016 (GW.h)				
	HIDROELÉCTRICA	TERMOELÉCTRICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL
NORTE	2893,30	827,80	0,00	475,71	4196,81
CENTRO	16588,90	21890,10	0,00	578,41	39057,41
SUR	3527,40	1302,90	241,82	0,00	5072,12
TOTAL	23009,60	24020,80	241,82	1054,11	48326,33

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.



Grafica 4: Producción de energía eléctrica (GW.h) 2016 en porcentaje de acuerdo a las diferentes áreas: Norte, Centro, Sur.

Fuente: Elaboración Propia.

El 20 de diciembre del 2016 se registró la máxima demanda la cual alcanzo un 6 492,41MW. Esta fue satisfecha en 10,31% por centrales del norte, un 80,27% en centrales del centro, finalmente un 9,42% por centrales del sur. Cuadro 8. [26]

Cuadro 8: Máxima Demanda (MW) del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2016

ÁREA	MÁXIMA DEMANDA (MW)					
	HIDROELÉCTRICA	TERMOELÉCTRICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL	%
NORTE	513,23	95,24	0,00	61,01	669,48	10,31%
CENTRO	2462,75	2691,94	0,00	56,68	5211,37	80,27%
SUR	523,93	87,64	0,00	0,00	611,57	9,42%
TOTAL COE	3499,91	2874,81	0,00	117,69	6492,41	100,00%

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.

La potencia efectiva máxima que se generó el 31 de diciembre 2016 alcanzó los 12 078,11 MW, en la cual continúa existiendo una mayor participación de capacidad efectiva de tipo termoeléctrico que fue del 56,97% (6 880,8 MW) mientras la capacidad efectiva por tipo de generación hidroeléctrico estuvo en 40,22% (4 858,2 MW), eólica en 2,01% (243,2 MW) y solar en 0,79% (96 MW) como se muestra en el cuadro 9; Además habido un incremento en la generación de Recursos Energéticos Renovables (RER) los cuales están conformados por las centrales hidroeléctricas de C.H. Chancay con 20 MW y la C.H. Rucuy con 20 MW y también el parque eólico Tres Hermanas con 97,2 MW. Del mismo modo, ingresaron al SEIN 980,8 MW de capacidad hidroeléctrica, 114 MW de centrales termoeléctricas, 58,4 MW en centrales de Reserva Fría y 1 226,1 MW en las centrales que conforman al nodo Energético del Sur (C.T. Puerto Bravo y C.T. Nodo Energético Planta Ilo). [26]

Cuadro 9: Potencia Efectiva (MW) del norte, centro y sur del Perú en los diferentes tipos de centrales durante el año 2016

AREA	POTENCIA EFECTIVA A DICIEMBRE 2016 (MW)				
	HIDROELÉCTRICA	TERMOELÉCTRICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL
NORTE	592,20	753,40	0,00	114,01	1459,61
CENTRO	3663,90	4072,80	0,00	129,20	7865,90
SUR	602,10	2054,50	96,00	0,00	2752,60
TOTAL	4858,20	6880,70	96,00	243,21	12078,11

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional

De acuerdo con los cuadros de potencia efectiva y de máxima demanda de potencia; se puede observar que la máxima demanda fue un 53,75% de la potencia eficaz que generó en total las áreas norte, centro y sur, entre las energías

renovables y no renovables; concluyendo que también en el año 2016 hubo una sobre generación de potencia eficaz lo cual causo un exceso de consumo de materia prima innecesaria produciendo una variación en el costo marginal.

El costo marginal del SEIN y precio de la barra son mostrados en el cuadro 10, donde se puede observar que los meses de junio y julio obtuvieron los valores más altos en el costo marginal y en el precio de barra, además se muestra el promedio anual del coto marginal el cual fue 21,41 US\$/MW.h durante el periodo 2016.

Cuadro 10: Costo Marginal Promedio del SEIN (US\$/MW.h) y Tarifa de Energía del año 2016

Costo Marginal Mensual del SEIN				Tarifa de Barra
Mes-Año	Tipo de Cambio	Mensual (\$/MWh)	Prom. Anual (\$/MWh)	Mensual (\$/MWh)
Enero-16	3,47	10,99	21,41	40,27
Febrero-16	3,53	12,42	21,41	39,87
Marzo-16	3,33	12,36	21,41	42,23
Abril-16	3,27	13,26	21,41	40,28
Mayo-16	3,37	19,90	21,41	43,95
Junio-16	3,29	38,82	21,41	45,04
Julio-16	3,36	34,13	21,41	44,08
Agosto-16	3,40	18,93	21,41	43,68
Septiembre-16	3,40	27,56	21,41	43,59
Octubre-16	3,37	17,93	21,41	44,05
Noviembre-16	3,41	27,60	21,41	43,45
Diciembre-16	3,36	23,08	21,41	44,12

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional

3.2 Determinación de la Ubicación Geográfica de la Central Geotérmica

En este objetivo se determinará la ubicación geográfica de la central geotérmica. para lo cual se toma de referencia los estudios que ha realizado el INGEMMET en la región de Moquegua.

La región de Moquegua es una de las más estudiadas debido a que posee un gran potencial geotérmico el cual puede sustituir en su totalidad a la energía de origen térmico, gracias a que se ubica en el sur del país, en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes centrales -parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, originando actividad magmática y flujos de calor a lo largo del flanco oeste de los Andes peruanos. [27]

En el año 2009, el INGEMMET inició la evaluación de los recursos geotérmicos en la región, a través del inventario de las manifestaciones geotermales e identificación de las áreas promisorias, que puedan destinarse a la explotación de la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica. [28]

Posteriormente, entre el 2010 y 2011, se realizó la caracterización geológica y geoquímica de las zonas geotermales identificadas en la región Moquegua. [28]

Para los estudios geológicos, usaron como base los mapas geológicos elaborados por INGEMMET, de escalas 1:100 000 y 1:50 000, también se usaron fotografías aéreas, imágenes satelitales ASTER y LANDSAT. En los trabajos de campo se procedió a la verificación de las unidades geológicas que afloran su posición y edad relativa, e igualmente se obtuvieron muestras representativas de roca para identificar las alteraciones de minerales. Además se efectuó el inventario y la descripción de las manifestaciones hidrotermales, como géiseres, manantiales, fumarolas, pozas ácidas, pozas de lodo, suelos vaporizantes, alteración hidrotermal. [29]

Los estudios geoquímicos desarrollados en esta evaluación, consistieron en el muestreo, análisis químicos y/o isotópicos de las manifestaciones geotermales del área. Para ello se utilizaron las técnicas de muestreo de aguas propuestas por Giggenbach & Goguel (1989), con el objetivo de obtener información de la composición química e isotópica (d^2H y $d^{18}O$) de las aguas, así como la estimación de temperaturas en profundidad utilizando geotermómetros de sílice y de cationes. [30]

A partir de datos químicos se ha efectuado la valoración de la temperatura de equilibrio mediante la aplicación de la geo termometría química en fase líquida como fluido dominante, de esta manera se ha estimado la temperatura de los fluidos en los reservorios geotérmicos desde 130 °C a 200 °C, en algunas áreas superan este valor. Estas temperaturas corresponderían a sistemas de mediana y alta entalpía, con posibilidad del aprovechamiento del recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica. [31]

De acuerdo a los resultados de los estudios de exploración geológica y geoquímica se realizará la determinación de ubicación geográfica de la central geotérmica definitiva, para ello se seleccionará entre las seis zonas geotérmicas la que mejor

se adecue a nuestro objetivo.

Las seis zonas geotermales de Moquegua son:

- ✓ ZONA GEOTERMAL DE TITIRE-PUENTE BELLO
- ✓ ZONA GEOTERMAL DE JESÚS MARÍA, ICHUÑA Y TOLAPALCA
- ✓ ZONA GEOTERMAL DE CALACOA
- ✓ ZONA GEOTERMAL DE ULLUCÁN-OMATE
- ✓ ZONA GEOTERMAL DE UBINAS
- ✓ ZONA GEOTERMAL DE CRUCERO

3.2.1 Zona Geotermal de Titire- Puente Bello

La ubicación de la zona geotermal de Titire está en el altiplano de los Andes, provincia de Moquegua, al sur del Perú, a una altitud de 4400 m s. n. m. en el valle formado por el curso del río Asuntuya, [28]

La manifestación geotermal en la zona se presenta en tres áreas diferentes: Puente Bello (también llamado Ccollo/Titire o solo Titire), Pampa Vilaje y quebrada Umajaeso. [28]

La zona Puente Bello se encuentra en el trayecto corto del río Asuntuya que fluye en dirección sur-oeste, es considerada como zona arqueológica, parte del patrimonio cultural del país. [28]

Geológicamente se encuentra circundado por una cadena de montañas, constituidas por rocas volcánico sedimentarias de la formación Maure. En sus alrededores de la zona se pueden observar afloramientos de esta formación, donde su facie sedimentaria se caracteriza por la presencia de limoarcillitas, areniscas (de grano grueso a fino), conglomerados (con clastos volcánicos), calizas lacustrinas de color marrón. [28]

La zona geotermal de Pampa Vilaje presenta un área alargada de alrededor de 0.5 km², y paralela al valle de tendencia sur-este en la margen derecha de la quebrada del mismo nombre; esta zona se encuentra a menos de 4 km de Puente Bello, y se caracteriza por la presencia de numerosas fuentes termales y una capa delgada blanquecina de carbonato poroso sinterizado, formando pequeños

montículos de cerca de 20 m de largo con un canto agudo y lineal de tendencia sur-este con filtraciones de agua caliente. [28]

Geológicamente Pampa Vilaje se desarrolla en depósitos de bofedal y aluviales, compuestos principalmente por una matriz arenolimososa. [28]

El área de quebrada Umajaeso, no tiene depósitos minerales asociados ni se observa alteración hidrotermal por ello no se expondrá su ubicación ni su geología. [28]

Siguiendo con la descripción de datos, se realizó el estudio de muestras colectadas en las tres áreas para la obtención de los parámetros físicos y químicos; los cuales se muestran en el cuadro 11 y cuadro 12.

Cuadro 11: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas

Nº	Fuente	Fecha	Temp. descarga °C	Temp. amb. °C	pH	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Proporción de flujo (L/min.)
1	Puente Bello	04/07/2010	83.6	12	6,97	16 770	300
2	Pampa Vilaje 4	02/09/2010	67.8	10	7	30 600	30
3	Titire 6	02/09/2010	82.9	11	7	16 390	300

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Cuadro 12: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas

Fuente	Código	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Puente Bello	1318-015	12	3 712	207	288	56
Pampa Vilaje 4	1318-016	30	7 179	582	247	26
Titire 6	1318-017	12	3 928	200	273	56

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Luego se realizaron mediciones de temperatura en las zonas de Puente Bello y Pampa Vilaje a través de geotermómetros de cationes; entre los que se cuentan: Los geotermómetros de Na/K, K/Mg, Na-K-Ca, Na-K-Mg; de los cuales no existe diferencia en la calidad de medición, pero es necesario analizarlos cuidadosamente y elegir aquellos que se correspondan de mejor manera con las fases minerales que se consideran en equilibrio. Particularmente las aguas cloruradas neutras (aguas maduras) son consideradas en equilibrio. [28]

En la figura 14 se muestra el geo indicador de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach (1991), donde las aguas de las fuentes termales de la zona geotermal de Titire-Puente Bello alcanzan equilibrio parcial, lo cual se logró gracias a los valores expuestos en el cuadro 12. [28]

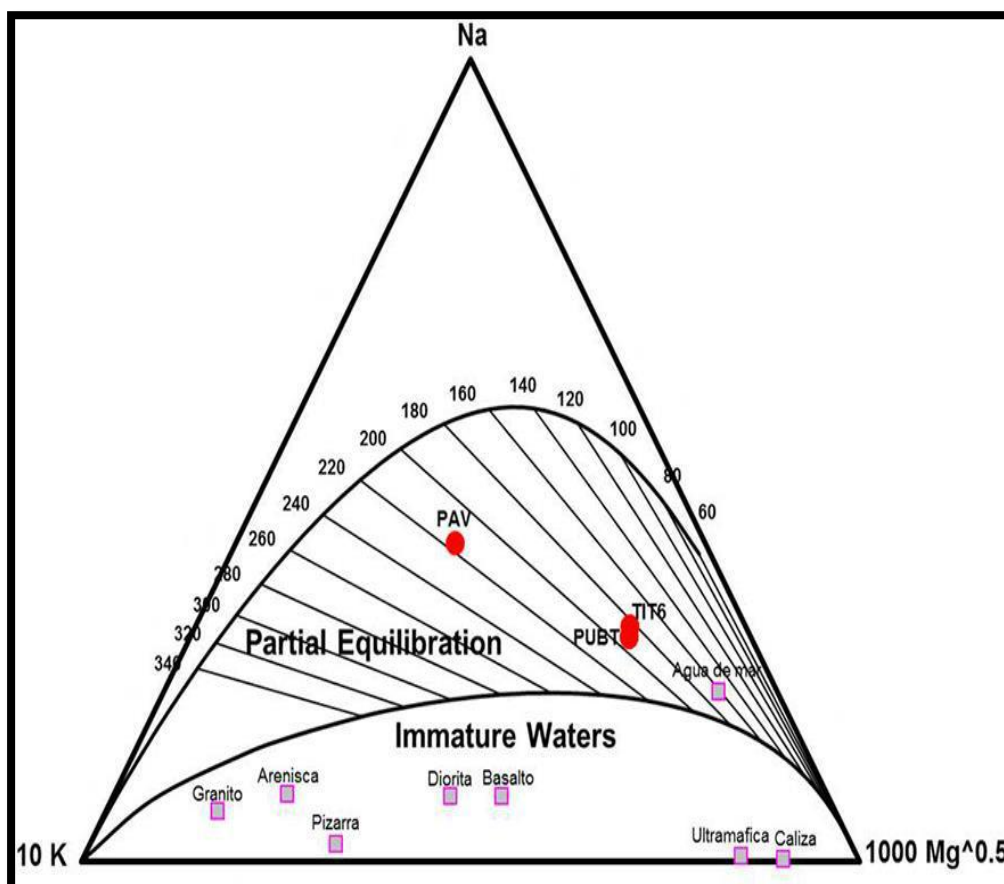


Fig.14: Geotermómetro de Na-K-Mg para las aguas termales de Titire-Puente Bello (Giggenbach, 1991).

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

A continuación, se presenta los valores obtenidos en las mediciones de temperatura con los geotermómetros en el Cuadro 13.

Cuadro 13: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros

Fuente	Na-K-Ca	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K (Giggenbach)	K/Mg (Giggenbach)
Puente Bello	181°C	172°C	132°C	190°C	125°C
Pampa Vilaje 4	217°C	200°C	166°C	216°C	175°C
Titire 6	177°C	165°C	125°C	184°C	124°C

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

3.2.2 Zona Geotermal de Jesús María, Ichuña y Tolapalca

En esta zona geotermal se han identificado tres sectores: Jesús María, Ichuña y Tolapalca, los cuales se localizan en el Altiplano de la cordillera de los Andes, en la región Moquegua, al sur del Perú, donde ocurre volcanismo Neógeno a Cuaternario. [32]

El sector Jesús María está ubicado al oeste del pueblo de Ichuña, se llega a través de una carretera afirmada (40 minutos); aquí las manifestaciones se ubican en un valle angosto de fuertes pendientes, a una altitud promedio de 4100 m s. n. m., formado por el curso del río San Antonio y circundado por cerros de rocas volcánicas. [32]

El sector de Ichuña también está ubicado al oeste del pueblo del mismo nombre (20 minutos). Las manifestaciones se ubican en la margen izquierda del río Ichuña a una altitud promedio de 3930 m s. n. m. [32]

Al sector de Tolapalca, ubicado al noroeste del pueblo de Ichuña, se llega a través de una carretera afirmada (120 minutos). Aquí las numerosas manifestaciones surgen en ambos márgenes del río Quemillane, a la altura del pueblo del mismo nombre. El sector se encuentra a una altitud promedio de 3870 m s. n. m. y está circundado por una cadena de cerros compuestos por rocas volcánicas, principalmente de origen magmático, situadas en la parte profunda de la corteza, conjuntamente con el calor de las rocas de intrusión. [32]

Los tres sectores abarcan un área aproximada de 44 km², asimismo en esta zona se tiene un clima seco con precipitaciones en los meses de enero a marzo. Las temperaturas varían entre 1°C y 25°C. [32]

Geológicamente en esta zona geotermal predominan rocas volcánicas y sedimentarias, y en menor distribución rocas intrusivas. Las rocas intrusivas que afloran principalmente son pórfidos andesíticos y riolíticos.

Después se realizó el estudio de muestras colectadas en las tres áreas para la obtención de los parámetros físicos y químicos; los cuales se muestran en el cuadro 14 y cuadro 15.

Cuadro 14: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas

Nº	Fuente	Fecha	Temp. descarga °C	Temp. amb. °C	pH	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Proporción de flujo (L/min.)
1	Jesús María	03/07/2010	50,8	14,3	6	37 100	30
2	Tolapalca	03/07/2010	47,5	16,3	6.1	13 930	300
3	Calasaya	04/07/2010	44,9	12,8	6.5	3 080	10

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Cuadro 15: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas

Fuente	Código	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Jesús María	1318-031	10	9 040	238	764	164
Tolapalca	1318-032	3	3 029	66	543	96
Calasaya	1318-033	1	491	25	181	47

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Con el geoindicador de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach el cual se muestra en la figura 15, se puede demostrar la distribución de los datos de las tres zonas geotermales, donde se observa que las aguas termales de Jesús María y Tolapalca caen dentro del equilibrio parcial, mientras que la fuente termal de Calasaya se ubica dentro de las aguas inmaduras. [32]

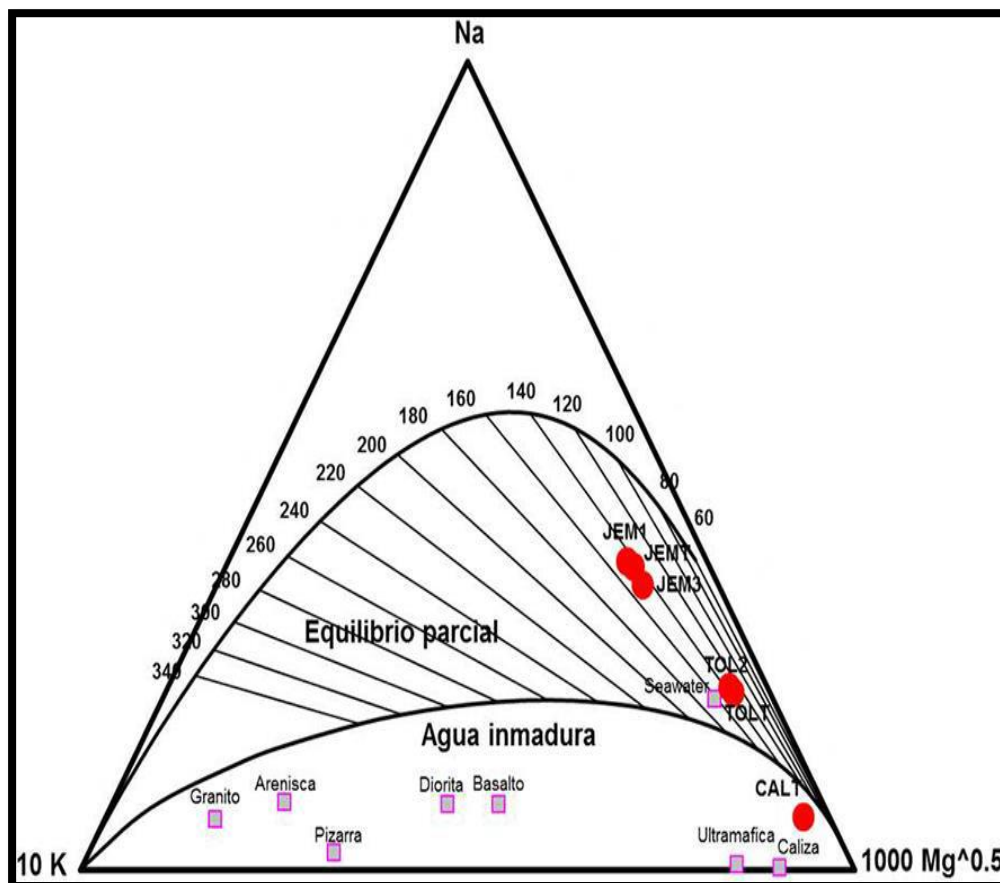


Fig.15: Geotermómetro de Na-K-Mg para las aguas termales de Jesús María, Tolapalca y Calasaya (Giggenbach 1991).

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

A continuación, se presenta los valores obtenidos en las mediciones de temperatura con los geotermómetros en el Cuadro 16.

Cuadro 16: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros

Fuente	Na-K-Ca	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K (Giggenbach)	K/Mg (Giggenbach)
Jesús María	149°C	124°C	78°C	144°C	113°C
Tolapalca	127°C	114°C	66°C	134°C	85°C

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

3.2.3 Zona Geotermal de Calacoa

La zona geotermal de Calacoa se localiza a unos 10 km al oeste del volcán Ticsani (5408 m s. n. m.), en la cordillera occidental de los Andes, a una altitud de 2950-4200 m s. n. m., en la región Moquegua. La fuente de calor que se manifiesta en esta zona geotermal estaría relacionada a la actividad volcánica del Ticsani. [32]

Las principales manifestaciones geotérmicas se encuentran en tres áreas: la primera llamada Secolaque, a 3 km al Norte-Oeste del pueblo de Calacoa; la segunda conocida como Putina, a 1,5 km al Sur-Oeste del mismo pueblo; y la tercera Soquesane, ubicada a 6 km al sur del volcán Ticsani. [32]

Geológicamente Calacoa tiene un afloramiento de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas; entre las rocas sedimentarias aflorantes se tiene las calizas, sobre estas yace el grupo Yura (Jurásico medio-Cretáceo inferior), en cuya parte inferior se tienen secuencias de areniscas intercaladas con lutitas y limoarcillitas (± 750 m de espesor) y en la parte superior se tiene calizas intercaladas con areniscas cuarzosas y lutitas (>400 m de espesor). [32]

En los siguientes cuadros 17 y 18 se expondrán los parámetros físico- químicos de las muestras colectadas en las tres áreas.

Cuadro 17: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas

Nº	Fuente	Fecha	Temp. descarga °C	Temp amb. °C	pH	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Proporción de flujo (L/min.)
1	Putina I	05/07/2010	88	18	6,71	2 700	40
2	Putina II	05/07/2010	91,8	19,6	7,86	3 320	30
3	Putina-1	02/09/2010	90,2	17	8	3 320	30
4	Putina-2	02/09/2010	89,3	18	8	2 970	30
5	Secolaque	07/10/2005	67,4	-	7	-	-
8	Putina	12/11/2010	82,6	14,5	7,86	3 310	25
9	Secolaque 2	12/11/2010	89,5	15	7,52	2 630	20

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Cuadro 18: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas

Fuente	Código	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Putina I	1318-052	3	552	51	71	7
Putina II	1318-053	3	658	55	64	5
Putina-1	1318-054	4	617	54	60	5
Putina-2	1318-055	-	536	49	72	12
Secolaque	1318-056	-	304	36	50	5
Putina	1318-059	2,82	491	48	68,4	8,07
Secolaque 2	1318-060	2,48	419	46	85,8	4,69

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Cuadro 19: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros

Fuente	Na-K-Ca	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K (Giggenbach)	K/Mg (Giggenbac)
Putina I	186°C	210°C	179°C	226°C	114°C
Putina II	185°C	202°C	169°C	218°C	122°C
Putina-1	187°C	205°C	173°C	221°C	122°C
Putina-2	153°C	209°C	177°C	225°C	105°C
Secolaque	142°C	232°C	206°C	246°C	108°C

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

3.2.4 Zona Geotermal De Ullucan-Omate

La zona geotérmica de Ullucán se localiza en la cordillera Occidental de los Andes, cerca al poblado de Omate, en la provincia de General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua, a una altitud de 2800 m s. n. m., a 20 km aproximadamente del volcán Huaynaputina. [33]

Geologicamente en Ullucán se tienen rocas de diversas edades. Las rocas más antiguas que afloran son las del Complejo Basal de la Costa, constituido principalmente por metagranodioritas; estas rocas afloran entre los cerros Huacallune y Chinca, al norte del pueblo de Omate. [33]

La zona geotermal de Ullucán-Omate cuenta con los siguientes parámetros físicos y químicos; cuadro 20 y 21.

Cuadro 20: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas

Nº	Fuente	Fecha	Temp. descarga °C	Temp. amb. °C	pH	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Proporción de flujo (L/min.)
1	Ullucán I	07/07/2010	23,7	19,5	7,95	5 710	50
2	Ullucán II	07/07/2010	75	20,3	6,56	13 150	-
3	Ullucán III	07/07/2010	79,5	18,4	6,81	13 900	50
4	Ullucán IV	07/07/2010	62,8	17,5	5,85	11 540	-
5	Ullucán V	07/07/2010	17,3	19,5	8,31	8 010	15
6	Ullucán -1	06/09/2010	74,6	20	7	13 440	50
7	Ullucán -2	06/09/2010	80	18	7	14 330	50

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Cuadro 21: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas

Fuente	Código	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Ullucán I	1318-076	7	976	164	188	29
Ullucán II	1318-077	18	2 526	429	375	54
Ullucán III	1318-078	19	2 744	446	384	69
Ullucán IV	1318-079	16	2 148	360	355	55
Ullucán V	1318-080	10	1 210	236	294	38
Ullucán-1	1318-081	-	2 408	431	335	52
Ullucán-2	1318-082	19	2 518	461	393	62

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

La evaluación de las muestras de agua en el geo indicador Na-KMg figura 17 permite determinar inmediatamente que las fuentes termales de Ullucán se encuentran dentro de las aguas inmaduras. Esto se debería a que las aguas termales se están mezclando con aguas superficiales del río Aguada Buena. [33]

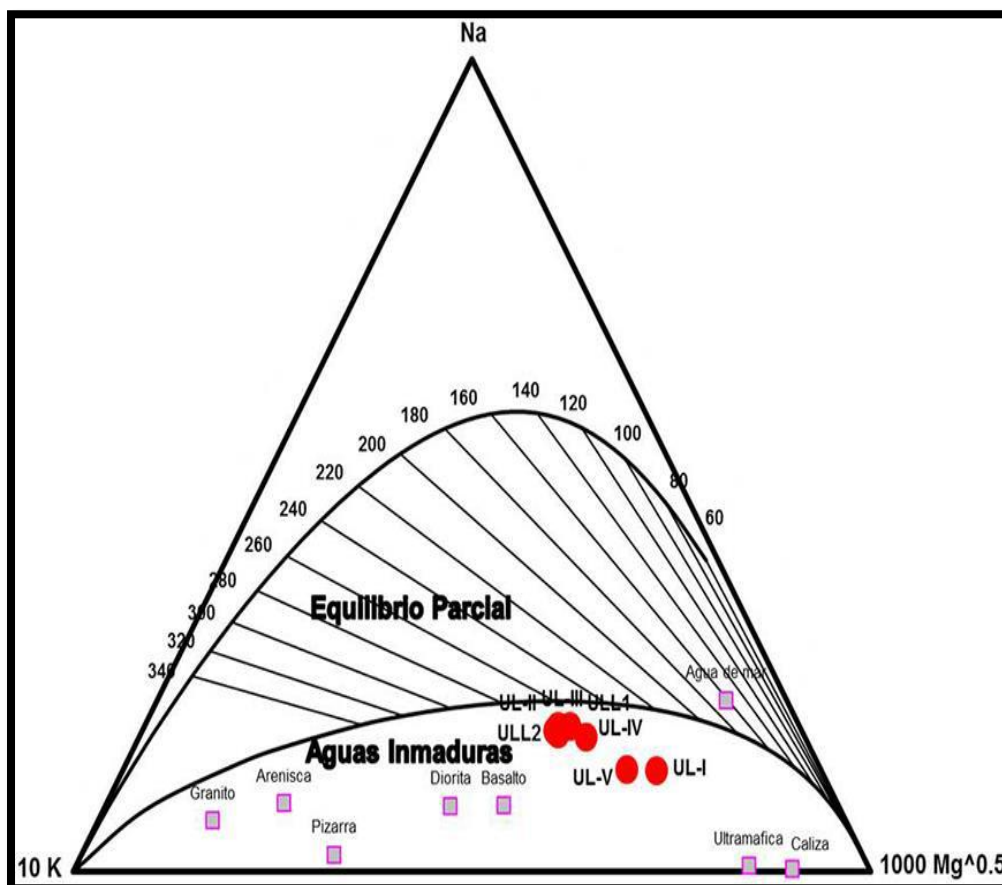


Fig.17: Geotermómetro de Na-K-Mg para las aguas termales de Ullucán-Omate (Giggenbach, 1991).

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

A continuación, se presenta en el cuadro 22 los valores obtenidos en las mediciones de temperatura con los geotermómetros.

Cuadro 22: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros

Fuente	Na-K-Ca	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K (Giggenbach)	K/Mg (Giggenbach)
Ullucán I	224°C	266°C	251°C	277°C	129°C
Ullucán II	238°C	267°C	253°C	278°C	150°C
Ullucán III	237°C	262°C	247°C	274°C	147°C
Ullucán IV	234°C	266°C	251°C	277°C	144°C
Ullucán V	234°C	282°C	273°C	292°C	136°C
Ullucán-1	242°C	272°C	260°C	283°C	151°C
Ullucán-2	243°C	275°C	263°C	286°C	150°C

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

3.2.5 Zona Geotermal de Ubinas

Esta zona se ubica en la provincia de General Sánchez Cerro, en el departamento de Moquegua, también abarca parte del departamento de Arequipa, en el sector de la laguna Salinas cerca del volcán Ubinas. [33]

La zona geotermal cubre un área aproximada de 1925 km², en donde se han identificado numerosas manifestaciones geotermales, principalmente en los sectores de la laguna Salinas, Ubinas y Yunga. La presencia del volcán Ubinas, es muy importante en esta zona por su actividad visible a través de emisiones fumarólicas. [33]

Las manifestaciones en esta zona están comprendidas entre los 3000 y los 4500 m s. n. m., asimismo en toda la zona predomina una topografía abrupta con valles escarpados y profundos, formados por la erosión de las rocas volcánicas, teniendo también la presencia de rocas sedimentarias e intrusivas. [33]

En los siguientes Cuadros 23 y 24 se expondrán los parámetros físico- químicos medidos.

Cuadro 23: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas

Nº	Fuente	Fecha	Temp. descarga °C	Temp amb. °C	pH	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Proporción de flujo (L/min.)
1	Eschaje I	09/07/2010	35,1	16,8	6,07	10 850	20
2	Eschaje II	09/07/2010	34,1	19,2	7,05	10 300	20
3	Baños del Cura	09/07/2010	31,3	21,8	6,4	12 440	30
4	Candagua	10/07/2010	50	21,7	6,86	2 940	10
5	Laguna Salinas	10/07/2010	14,3	9,3	8,72	1 053	-
6	Lucco	11/07/2010	41,3	20	7	13 000	30

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Cuadro 24: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas

Fuente	Código	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Eschaje I	1318-094	6	2 108	129	178	28
Eschaje II	1318-095	5	2 081	131	186	25
Baños del Cura	1318-096	3	2 399	129	244	29
Candagua	1318-097	2	420	21	197	9
Laguna Salinas	1318-098	-	56	22	123	34
Lucco	1318-099	10	3 502	120	539	57

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Gracias al geo indicador de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach (figura 18) muestra que las aguas termales de Eschaje I, Eschaje II, Baño del Cura y Lucco alcanzan el equilibrio parcial, mientras que las fuentes termales de Candagua y laguna Salinas son aguas inmaduras.

Es importante indicar que las aguas termales de los 6 lugares están siendo mezcladas con aguas superficiales las cuales provienen de los ríos. [33]

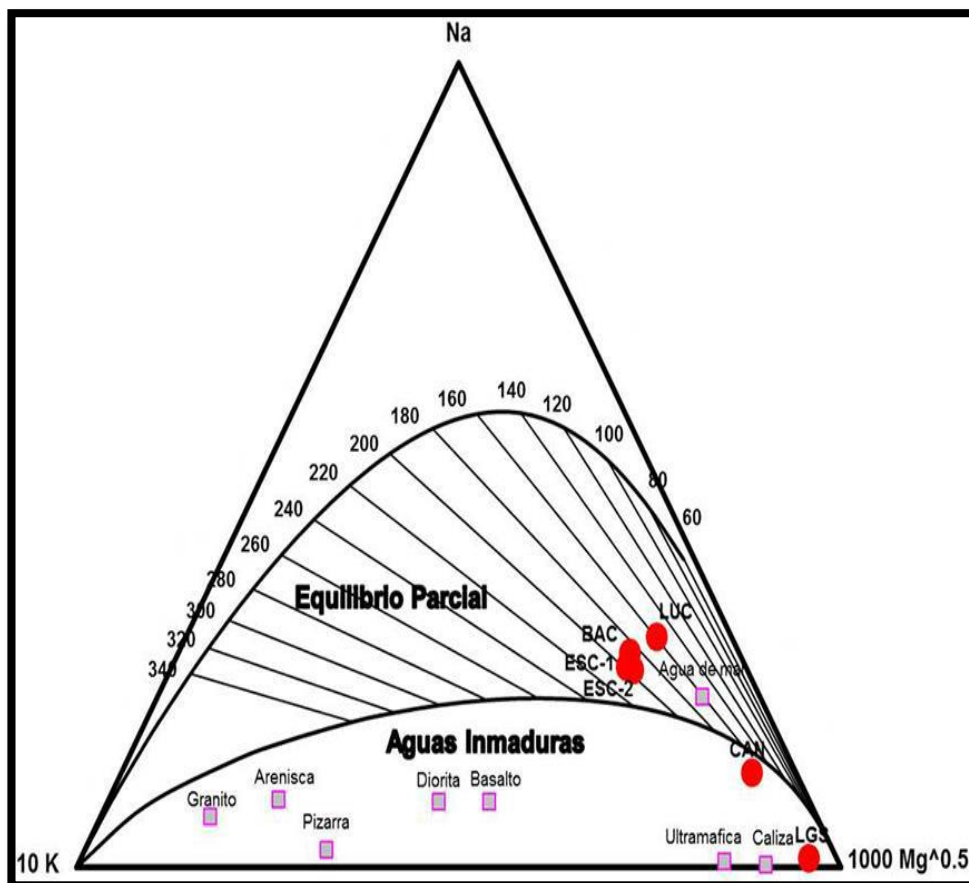


Fig. 18: Geotermómetro de Na-K-Mg para las aguas termales de Ubinas (Giggenbach, 1991).

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

A continuación, se presenta los valores que se obtienen en las mediciones de temperatura con los geotermómetros en el Cuadro 25.

Cuadro 25: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros

Fuente	Na-K-Ca	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K (Giggenbach)	K/Mg (Giggenbach)
Eschaje I	180°C	178°C	140°C	196°C	122°C
Eschaje II	181°C	180°C	143°C	198°C	123°C
Baños del Cura	172°C	169°C	129°C	187°C	121°C
Candagua	89°C	164°C	123°C	182°C	86°C
Lucco	150°C	140°C	95°C	159°C	109°C

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

3.2.6 Zona Geotermal de Crucero

La zona geotermal de Crucero está ubicada en el Altiplano de los Andes, en el distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto, región de Moquegua, al sur del Perú, a una altitud de 4600 m. s. n. m. La topografía es de tierra plana, rodeada de montañas, la mayor parte del área no tiene cultivos, sino pastos para la crianza de alpacas. Las fuentes termales se encuentran en tres áreas del valle: Fuente viscachuni, cruceo 9 y crucero. . [34]

Geológicamente la zona geotermal de Crucero está cubierta en gran parte por relleno aluvial, muchas veces con vegetación escasa. [34]

La zona geotermal de Crucero cuenta con los siguientes parámetros físicos y químicos; cuadro 26 y 27.

Cuadro 26: Parámetros físicos medidos de las muestras colectadas

No	Fuente	Fecha	Temp. de descarga °C	Temp. amb. °C	pH	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Proporción de flujo (L/min.)
1	Fuente Viscachuni	28/08/2010	43	25	6	6 700	210
2	Crucero 9	29/08/2010	61	-	7	19 300	<1
3	Crucero	02/07/2010	72,6	2	6,4	20 100	<1

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

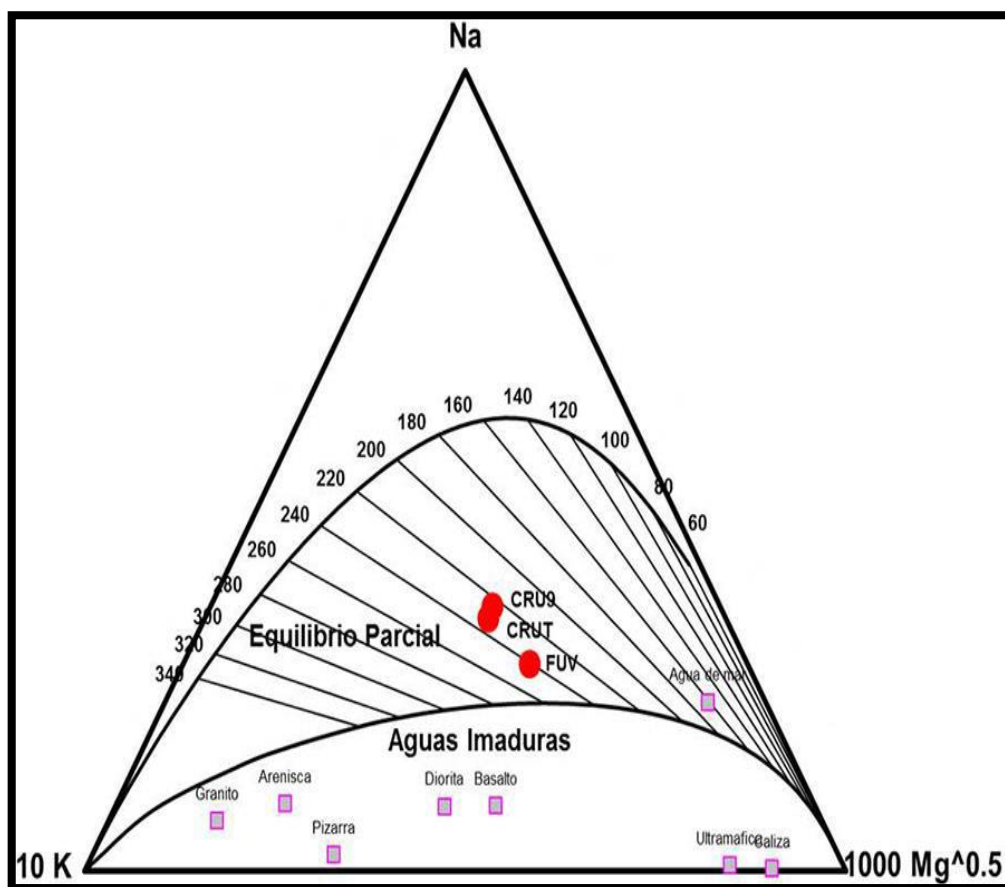
Cuadro 27: Parámetros químicos medidos de las muestras colectadas

Fuente	Código	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L
Fuente Viscachuni	1318-100	14	1 262	140	68	5
Crucero 9	1318-101	42	4 311	391	141	24
Crucero	1318-102	36	4 600	455	167	30

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

En la figura 19 se presenta el geo indicador de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach, con la distribución de los datos de las fuentes termales de Crucero, donde se observa que las aguas caen dentro de la región de equilibrio parcial pero con tendencia a la línea de equilibrio químico, podría indicar que las aguas están siendo mezcladas con aguas superficiales o asociadas a la represa de Pasto Grande, ya que las fuentes termales emergen a 6 km de esta represa. [34]

Fig. 19: Geotermómetro de Na-K-Mg para las aguas termales de Crucero



(Giggenbach, 1991).

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

A continuación, se presentará los valores obtenidos en las mediciones de temperatura con los geotermómetros Cuadro 28.

Cuadro 28: Resultados del cálculo de temperaturas en °C por geotermómetros

Fuente	Na-K-Ca	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K (Giggenbach)	K/Mg (Giggenbach)
Crucero	224°C	216°C	186°C	231°C	163°C
Fuente Viscachuni	214°C	226°C	199°C	241°C	145°C
Crucero 9	219°C	209°C	177°C	225°C	162°C

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

De acuerdo a la descripción de las seis zonas geotérmicas; se escogerá la zona de Crucero en el área de Fuente Viscachuni la cual tiene un rango de temperatura de 199°C - 241°C.

3.3 Evaluación del potencial energético de la central geotérmica

Primero se calculará la temperatura de salida del fluido geotérmico (Agua blanda), la cual se inyectará en la perforación que se hará en el subsuelo; se usa el agua blanda debido a que posee muy bajas proporciones de sales las cuales a la larga pueden deteriorar a todo el sistema de generación.

Para calcular la temperatura se colocará los valores a usar en la tubería enterrada la cual llevará el agua blanda cuadro 29:

Cuadro 29: Datos de la Tubería enterrada en el sub suelo

Datos de la Tuberia (Intercambiador)		
Detalle	Valor	Unidad
Radio interno	0,1683	m
Radio externo	0,1778	m
Coraza	0,0111	m
Longitud	3 000	m
Densidad del material	7 854	$\frac{kg}{m^3}$
Conductividad térmica del material	60,5	$\frac{W}{m \cdot K}$
Capacidad calorífica del material	434	$\frac{J}{kg \cdot K}$

Fuente: Elaboración Propia, guiado de anexo 1 y 2.

Ademas, se presentara los datos del geofluido en el sub suelo los cuales se obtienen gracias al INGEMMET; cuadro 30.

Cuadro 30: Datos del geo fluido en el sub suelo

Datos del Geofluido		
Detalle	Valor	Unidad
Temperatura de contacto	220	°C
Densidad	847,45	$\frac{kg}{m^3}$
Capacidad Calorifica	4196	$\frac{J}{kg \cdot K}$
Conductividad Térmica	0,87	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
Coefficiente de Transferencia del geofluido	800	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realizara un cuadro con los datos fisicos y quimicos del agua blanda a usar; cuadro 31.

Cuadro 31: Datos del agua blanda en la entrada del intercambiador

Datos del agua blanda en la entrada del intercambiador		
Detalle	Valor	Unidad
Temperatura del entrada al ducto	100	°C
Temperatura del geofluido	220	°C
Densidad inicial	958,4	$\frac{kg}{m^3}$
Capacidad Calorifica	4 217	$\frac{J}{kg \cdot K}$
Conductividad Térmica	0,6791	$\frac{W}{m \cdot K}$
Velocidad de entrada	2,4	$\frac{m}{s}$
Viscosidad dinámica	0,000281	$\frac{kg}{m \cdot s}$
Coefficiente de dilatacion volumetrica	0,0015	°C ⁻¹
Diferencia de Temperatura	120	°C

Fuente: Elaboración Propia, guiado de anexo 3 y 4.

Para que se pueda hallar la temperatura de salida del agua blanda se procede a calcular en primer lugar algunas variables hidrodinámica:

Número de Reynolds

$$R_e = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$R_e = \frac{2,4 \frac{m}{s} * 958,4 \frac{kg}{m^3} * 0,3366m}{0,0003 \frac{kg}{m * s}}$$

$$R_e = 2580779,52$$

Conociendo el número de Reynolds y sabiendo que es mayor a 10 000, se calculara el:

Número de Prandl

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$Pr = \frac{4217 \frac{J}{kg \cdot K} * 0,0003 \frac{kg}{m \cdot s}}{0,6791 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$Pr = 1,86$$

Con estos datos se calculara el numero de Nusselt:

Número de Nusselt

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,3} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$Nu = 0,023(2580779,52)^{0,8}(1,86)^{0,3}$$

$$Nu = 3732,35$$

Posteriormente, se calculara el Coeficiente de transferencia:

Coeficiente de transferencia de calor del agua blanda

$$h_{\text{Agua blanda}} = \frac{K_{\text{Agua blanda}} \cdot Nu}{D_i} \quad [kW/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$h_{H_2O \text{ Blanda}} = \frac{0,6791 \frac{W}{m \cdot K} * 3732,35}{0,3366 \text{ m}}$$

$$h_{H_2O \text{ Blanda}} = 7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Se Observa que este valor se encuentra dentro del rango que se muestra en el anexo 5.

Una vez conocido el coeficiente de transferencia de calor del agua blanda, se calculara la resistencia termica:

$$R = R_i + R_{pared} + R_e \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$R = \frac{1}{2 * \pi * r_i * L * h_{\text{Agua blanda}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 * \pi * L * K_{\text{material}}} + \frac{1}{2 * \pi * r_e * L * h_{\text{geofluido}}}$$

Se Toma como referencia que el coeficiente de transferencia de calor del geofluido es de 700 W/m².K (Dato obtenidos por el INGEMET).

$$R = \frac{1}{2 * \pi * 0,1683\text{m} * 3000\text{m} * 7530,12 \frac{W}{m^2.K}} + \frac{\ln\left(\frac{0,1778}{0,1683}\right)}{2 * \pi * 3000\text{m} * 60,5 \frac{W}{m.K}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,1778\text{m} * 3000\text{m} * 700 \frac{W}{m^2.K}}$$

$$R = 5,16 * 10^{-7} \frac{K}{W}$$

Despues se determinara el caudal del agua blanda que entrara en la tubería:

$$Q = A.V [m^3/s] \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$Q = \pi * (0,1667\text{m})^2 * 2,4 \frac{m}{s}$$

$$Q = 0,21 \frac{m^3}{s}$$

Ademas se calcula el flujo masico de agua blanda en la entrada:

$$\dot{m} = \rho.Q [kg/s] \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$\dot{m} = 958,4 \frac{kg}{m^3} * 0,21 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m} = 200,79 \frac{kg}{s}$$

Finalmente, se calcula la temperatura de salida, teniendo en cuenta que la temperatura de las paredes del intercambiador son asumidas por el valor promedio del acuífero geotermal, el cual es $T_{pared} = 220^{\circ}C$

$$T_s = T_{pared} + \left[(T_i - T_{pared}) e^{\left[\frac{-1}{Q \cdot \rho \cdot Cp \cdot R} \right]} \right] \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$T_s = 220 + \left[(100 - 220) e^{\left[\frac{-1}{0,2095 * 958,4 * 4217 * 5,16 * 10^{-7}} \right]} \right]$$

$$T_s = 207,83^\circ C$$

Esto quiere decir que la temperatura del agua blanda varia e incrementa su valor debido a la absorcion de calor, el cual es emitido por el geofluido y las rocas incandescentes presentes en el subsuelo a profundidad, obteniendose una temperatura de salida T_s equivalente a $207,35^\circ C$.

Cálculo del volumen y costo del Agua Blanda

Para hallar el Volumen del agua blanda, se sabe que el r de la tubería en el subsuelo es 0,167m y la longitud es de 3000m por ello:

$$V_{agua\ blanda} = \pi \cdot r^2 \cdot z \ [m^3] \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$V_{agua\ blanda} = \pi * (0,1683m)^2 * 3000m$$

$$V_{agua\ blanda} = 266,96 \ m^3$$

Luego se halla el volumen total en todo el intercambiador dejando un espacio horizontal de 6 m para evitar la cavitación:

$$V_{Total\ agua\ blanda} = 2 \cdot V_{agua\ blanda} \ [m^3] \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$V_{Total\ agua\ blanda} = 2 * 266,96m^3$$

$$V_{Total\ agua\ blanda} = 533,92 \ m^3$$

El volumen del tanque del agua blanda es:

$$V_{Tanque\ del\ agua\ blanda} = V_{Total\ agua\ blanda} \cdot 1,4 \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$V_{Tanque\ del\ agua\ blanda} = 533,92 \ m^3 * 1,4$$

$$V_{Tanque\ del\ agua\ blanda} = 747,488m^3$$

Sabiendo que el metro cubico de agua blanda está a S/.74,20 Nuevos soles, estimamos el gasto a realizar por la compra de dicho insumo:

$$\text{Costo}_{\text{Agua blanda}} = \frac{S}{m^3} 74,20 (V_{\text{Total agua blanda}} * 1,3) \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$\text{Costo}_{\text{Agua blanda}} = \frac{S}{m^3} 74,20 * 694,096 m^3$$

$$\text{Costo}_{\text{Agua blanda}} = S / 51 501,92$$

Ó

$$\text{Costo}_{\text{Agua blanda}} = \$15 192$$

Transferencia de calor en el intercambiador en el subsuelo

Para hallar el calor transferido se aplicará la ecuación (40) de la cual se tiene en cuenta que el sistema solo tomara un lado "L" del intercambiador. La cual tiene forma de U debido que se depreciara la parte inferior de la "U" y la L del otro lado de la "U", en este intercambiador la presión es constante.

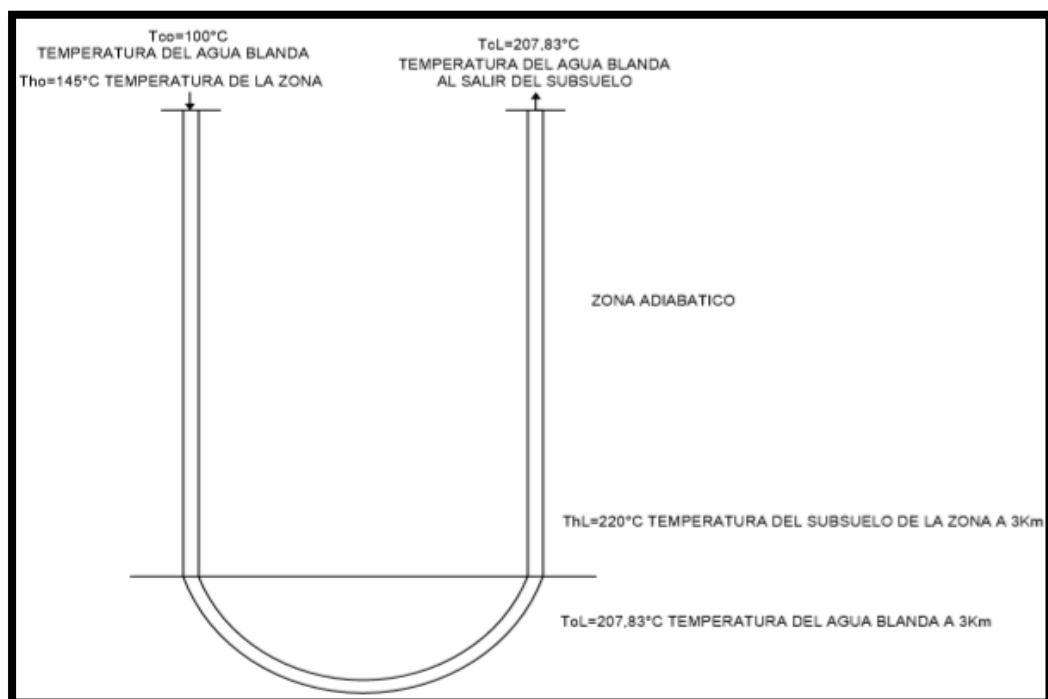


Fig. 20: Ilustración de funcionamiento del intercambiador de calor en el subsuelo
Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 32: Datos de entrada y salida del agua blanda y del intercambiador

Datos	Parámetro	Valor
ΔT_L	T_{hL}	220°C
	T_{cL}	207,83°C
ΔT_0	T_{ho}	145°C
	T_{co}	100°C
$h_{\text{Agua blanda}}$	h	7 530,12 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$h_{\text{geofluido}}$	h	1 045,89 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
K_{material}	K	60,5 $\frac{W}{m \cdot K}$
Profundidad	L	3 000 m
r_e	r	0,1778 m
r_i	r	0,1683 m

Fuente: Elaboración Propia.

$$Q = \left[\frac{\Delta T_L - \Delta T_0}{\ln \left[\frac{\Delta T_L}{\Delta T_0} \right]} \right] \cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{h_{\text{Agua blanda}}} + \frac{1}{h_{\text{geofluido}}}} \right] \quad \text{Ecuación (44)}$$

$$\cdot \left[\frac{2\pi Z(r_e - r_i)}{\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right)} \right] [kJ/s \text{ ó } kW]$$

$$Q = \left[\frac{(12,17 - 45)K}{\ln \left[\frac{12,17K}{45 K} \right]} \right] \cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2K}} + \frac{1}{1045,89 \frac{W}{m^2K}}} \right] \cdot$$

$$\left[\frac{2 * \pi * 3000m * (0,1778 m - 0,1683m)}{\ln \left(\frac{0,1778m}{0,1683m} \right)} \right]$$

$$Q = [25,11K] \cdot \left[918,34 \frac{W}{m^2K} \right] \cdot [3261,096m^2]$$

$$Q = 75,199 \frac{MJ}{s}$$

Calculo para la selección de cada componente de la central geotermica

Para realizar el calculo en cada componente, se debera tener en cuenta la distribucion de los componentes de la central y el orden en que trabaja el fluido (Isobutano); la cual se observa en la figura 21.

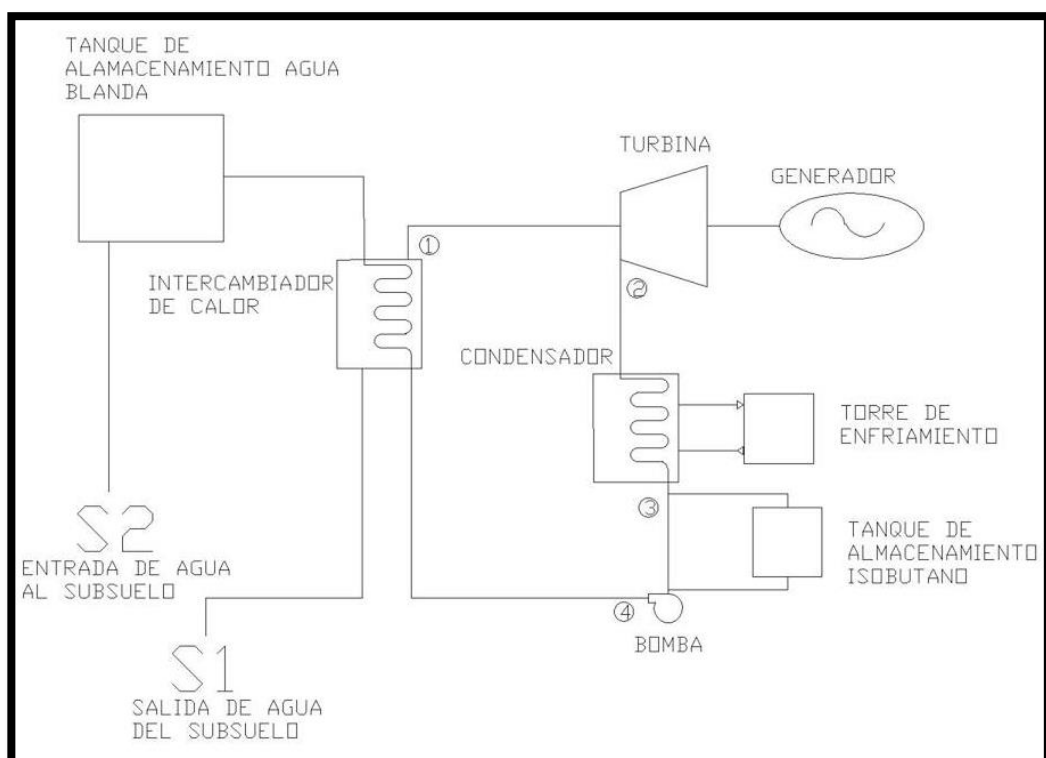


Fig. 21: Distribución de los componentes de la central y orden en que trabaja el Isobutano.

Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo para la selección del Intercambiador de calor entre el Agua Blanda y el Refrigerante Isobutano

Cuadro 33: Datos de entrada, salida del agua blanda y del refrigerante Isobutano

Datos	Parámetro	Valor
T_{agua}	T_2	100 °C ó 212 °F
	T_1	207,83 °C ó 406,09 °F
$t_{isobutano}$	t_2	150°C ó 302 °F
	t_1	-22,58°C ó -8,644 °F
$Q_{entrada}$	Q_e	$75,199 \frac{MJ}{s}$
Q_{cedido}	Q_s	$58,837 \frac{MJ}{s}$

Fuente: Elaboración propia.

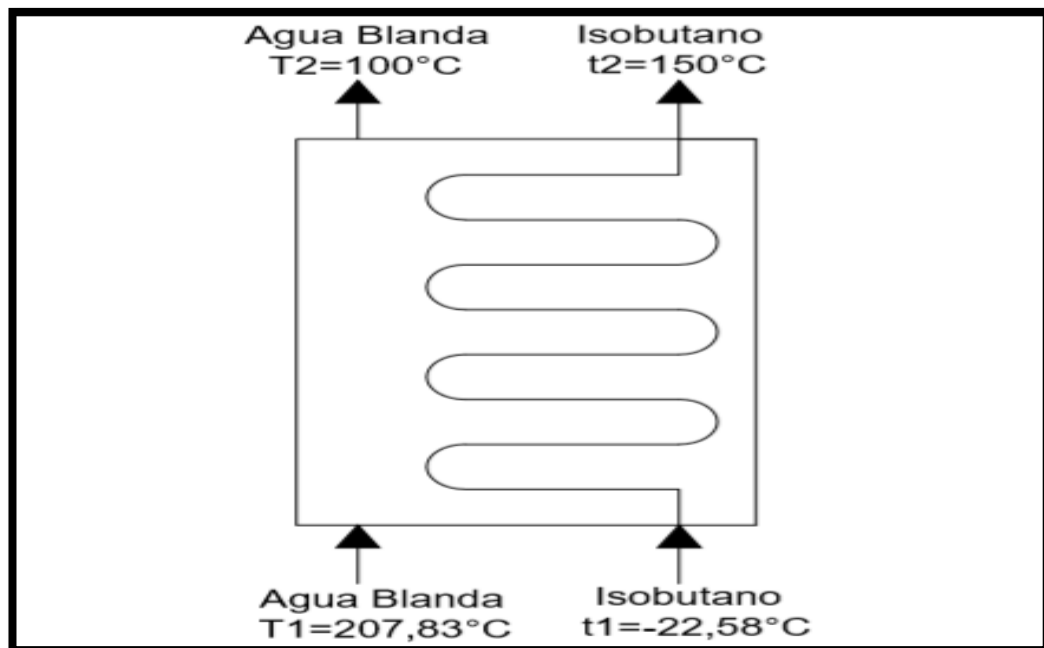


Fig. 22: Ilustración del intercambiador.

Fuente: Elaboración propia.

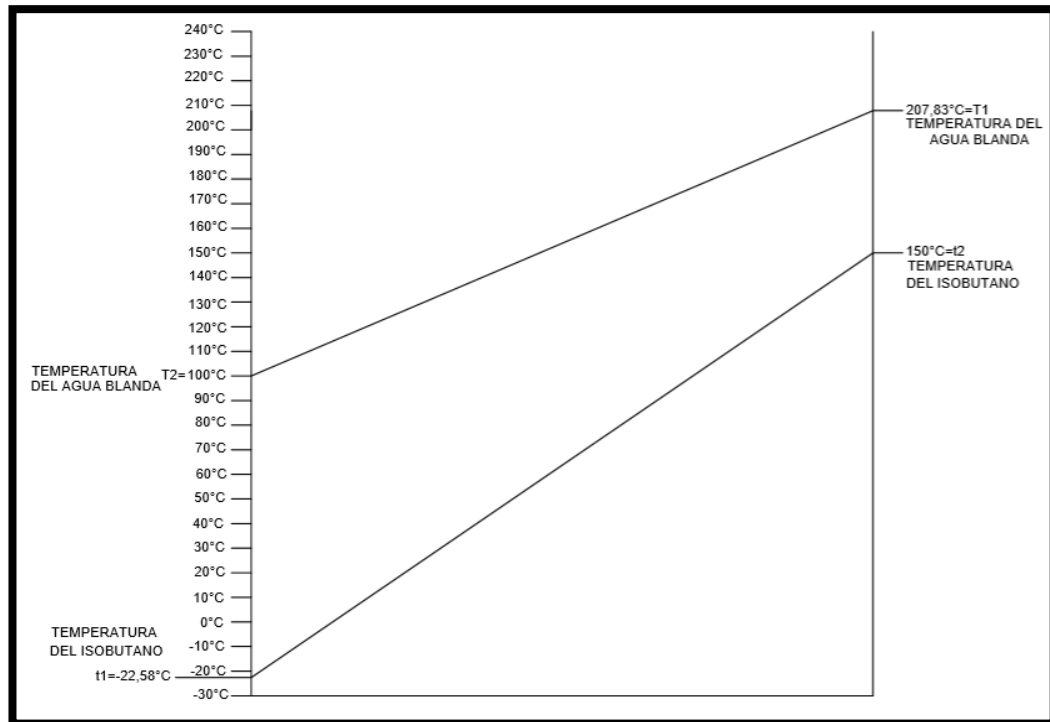


Fig. 23: grafica de la variación de temperatura entre los dos fluidos.
Fuente: Elaboración Propia

$$Q_{entregado} = Q_{cedido} + Perdidas \text{ [kJ/s ó kW]} \quad \text{Ecuación (45)}$$

$$75,199 \text{ MJ/s} = 58,837 \text{ MJ/s} + Perdidas$$

$$Perdidas = 16,362 \frac{\text{MJ}}{\text{s}}$$

Se sabe que:

$$Q_{cedido} = U_o \cdot A_o \cdot MTD \text{ [kJ/s ó kW]} \quad \text{Ecuación (46)}$$

$$A_o = \frac{Q_{cedido}}{U_o \cdot MTD} \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{Ecuación (47)}$$

$$A_o = \frac{58,84 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{U_o \cdot MTD}$$

De acuerdo a la teoría de intercambiador de calor, si la temperatura t_2 es mayor a T_2 se usara celdas en series, las celdas dividiran el Q_{cedido} en dos.

Diferencia de temperatura media corregida

Para hallar el LMTD y el MTD se usara los datos determinados en el cuadro 33

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} [K] \quad \text{Ecuación (49)}$$

$$LMTD = \frac{(406,094 - 302) - (212 - (-8,644))}{\ln \frac{(406,094 - 302)}{(212 - (-8,644))}}$$

$$LMTD = 155,14^\circ\text{F}$$

El factor F se obtiene de graficas, de acuerdo a los valores calculados en "P" ó en "R".

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{Ecuación (50)}$$

$$P = \frac{302 - (-8,644)}{406,094 - (-8,644)}$$

$$P = 0,75$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{Ecuación (51)}$$

$$R = \frac{406,094 - 212}{302 - (-8,644)}$$

$$R = 0,62$$

De acuerdo al anexo 6 que se encuantra en anexos podemos obtener que:

$$F = 0,879$$

$$MTD = F \cdot LMTD [K] \quad \text{Ecuación (48)}$$

$$MTD = 0,879 * 155,14^\circ\text{F}$$

$$MTD = 136,368^\circ\text{F} \text{ ó } 331,132 \text{ K}$$

Coeficientes de transferencia de calor

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_{io}} + r_{di} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2K_m} + r_{do} + \frac{1}{h_o} [m^2 \cdot K/kW] \quad \text{Ecuación (53)}$$

Para desarrollar esta ecuación se utilizara una tubería de $1 \frac{1}{4}$ de Diámetro externo, con una separación triangular a 1 in; con 14 ft de largo y espesor 14 BWG el cual es seleccionado del anexo 7.

Donde: d_i : 1,08 in , d_o : 1,25 in

Coeficiente de película, lado del tubo (h_{io})

Para hallar este valor se recurre al anexo 8, para lo cual se conoce que el flujo másico es $200,79 \frac{Kg}{s}$ ó $442.67 \frac{lb}{s}$.

$$h_{io} = 1025,5 \frac{BTU}{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}$$

Coeficiente de película, lado del casco (h_o)

Para hallar este valor se recurre al anexo 9, para lo cual se conoce que el flujo másico es $200,79 \frac{Kg}{s}$ ó $442.67 \frac{lb}{s}$.

$$h_o = 325 \frac{BTU}{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}$$

Resistencia de suciedad externa e interna (r)

Para hallar este valor se recurre al anexo 11, conociendo que el fluido que va en los tubos es vapor de agua y en el exterior es el Isobutano.

$$r = 0,0015 \frac{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}{BTU}$$

Conductividad termica del material (K_m)

El material que se utiliza es acero al carbono, de acuerdo a esto la conductividad termica es:

$$K_m = 34,96 \frac{BTU}{horas \text{ pies } ^\circ F}$$

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{1025,5 \frac{BTU}{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}} + \left(0,0015 \frac{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}{BTU} * \frac{1,25 \text{ in}}{1,08 \text{ in}} \right)$$

$$+ \frac{0,1042 \text{ pies} \ln\left(\frac{1,25 \text{ in}}{1,08 \text{ in}}\right)}{2 * 34,96 \frac{BTU}{horas \text{ pies} \text{ } ^\circ F}} + 0,0015 \frac{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}{BTU}$$

$$+ \frac{1}{325 \frac{BTU}{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}}$$

$$U_o = 133,226 \frac{BTU}{horas \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ F}$$

Ó

$$U_o = 756,492 \frac{W}{m^2 K}$$

Sabiendo el valor del Coeficiente de transferencia de calor podemos hallar el area el cual se debe dividir en dos debido a que se usaran dos celdas como se ha explicado anteriormente.

$$A_o = \frac{58,84 * 10^3}{U_o \text{ MTD}}$$

$$A_c = \frac{A_o}{2} = \frac{29,42 \frac{MJ}{s}}{U_o \text{ MTD}}$$

$$A_c = \frac{29,42 \frac{MJ}{s}}{756,492 \frac{W}{m^2 K} * 331,132 \text{ K}}$$

$$A_c = 117,446 m^2$$

Por ultimo se halla el numero de tubos en cada celda:

$$N_t = \frac{A_c}{\pi \cdot D_{ext} \cdot L}$$

Ecuación (54)

$$N_t = \frac{117,446m^2}{\pi * 0,0318m * 4,267m}$$

$$N_t = 275,511$$

Cálculo del Volumen y Costo del Isobutano

Teniendo en cuenta que tenemos 276 tuberías, con un área de celda de $117,916m^2$, además, sabemos que cada tubería mide aproximadamente 14 ft de largo lo que equivale a 4,267m.

Como podemos estimar, cada tubería posee un área transversal de $0,0304m^2$, esto nos sirve para calcular el volumen de la tubería dentro del intercambiador de calor.

$$V_{tuberias} = Area\ efectiva.\ longitud\ del\ ducto[m^3] \quad \text{Ecuación (55)}$$

$$V_{tuberias} = 0,0304\ m^2 * 4,267m$$

$$V_{tuberias} = 0,1297\ m^3$$

Ahora, para hallar el volumen del Isobutano se utiliza la siguiente formula:

$$V_{isob} = N_t \cdot V_{tuberias}[m^3] \quad \text{Ecuación (56)}$$

$$V_{isob} = 276 * 0,1297m^3$$

$$V_{isob} = 35.797m^3$$

A este valor se multiplica por dos, debido a que tiene dos celdas en serie.

$$V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} = V_{isob} \cdot 2 [m^3] \quad \text{Ecuación (57)}$$

$$V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} = 35,797m^3 * 2$$

$$V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} = 71,594m^3$$

Volumen del almacén de Isobutano es:

$$V_{Tanque\ del\ Isobutano} = \quad \text{Ecuación (58)}$$

$$V_{total\ del\ isobutano\ en\ las\ dos\ celdas} \cdot 1,4 [m^3]$$

$$V_{Tanque\ del\ Isobutano} = 71,594m^3 * 1,4$$

$$V_{\text{Tanque del Isobutano}} = 100,232m^3$$

Se Sabe que el costo por cubo es de S/. 144,87 nuevos soles, se calcula el gasto efectuado por la adquisición de $93,41m^3$ de Isobutano.

$$\text{costo}_{\text{isobutano}} = S/.144,87 * (V_{\text{total del isobutano en las dos celdas}} * 1,3) \quad \text{Ecuación (59)}$$

$$\text{costo}_{\text{isobutano}} = \frac{S/}{m^3} 144,87 * 93,072 m^3$$

$$\text{costo}_{\text{isobutano}} = S/.13 483,34$$

Ó

$$\text{costo}_{\text{isobutano}} = \$ 3 977,39$$

Cálculo para el Aprovechamiento del Potencial Geotérmico en la Generación de Potencia

Según el principio de funcionamiento de Ciclo Rankine basada en la primera ley de termodinámica, aplicaremos cada una de las fórmulas que se han explicado con anterioridad en los componentes que se usaran en nuestra centra.

Estado Inicial 1

$$P_1 = 30 \text{ bar}$$

$$T_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

Se utiliza la tabla de las propiedades termodinámicas del isobutano la cual se encuentra en anexo 11; se obtiene:

$$h_1 = 896,582 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 = 5,17 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Estado 2

Se Tiene en cuenta que el proceso es isoentrópico, es decir que la entropía del proceso 1 y 2 son iguales, según la segunda ley de la termodinámica hallamos la entalpía 2, considerando una presión de expansión de 0,65 bar.

$$P_2 = 0,65 \text{ Bar}$$

$$s_2 = s_1 = 5,17 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$h_2 = 719,951 \frac{kJ}{kg}$$

Seguidamente, se calculara el valor de la entalpía h_{2r} mediante siguiente ecuación teniendo en cuenta la eficiencia de la turbina a usar:

$$h_{2r} = [h_1 - \eta_{TV}(h_1 - h_2)] [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$h_{2r} = \left[896,582 \frac{kJ}{kg} - 0,88 * \left(896,582 \frac{kJ}{kg} - 719,951 \frac{kJ}{kg} \right) \right]$$

$$h_{2r} = 741,147 \frac{kJ}{kg}$$

Estado 3

Se Calcula los valores de la entalpia y volumen especifico en estado líquido saturado a una presión de 0,65 bar.

$$h_3 = -23,904 \frac{KJ}{Kg}$$

$$v_3 = 0,002 \frac{m^3}{Kg}$$

Estado 4

Se Calcula la entalpia del estado 4 teniendo en cuenta que la presión del estado 4 es igual a la presión del estado 1 y tomándose en consideración los valores hallados en el estado 3.

$$h_4 = h_3 + v_3(P_4 - P_3) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$h_4 = -23,904 \frac{kJ}{kg} + 0,002 \frac{m^3}{Kg} * (30 - 0,65) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_4 = -18,034 \frac{kJ}{kg}$$

Posteriormente, se calcula el estado real de la entalpía h_{4r} teniendo en cuenta la eficiencia de la bomba a usar:

$$h_{4r} = -\frac{h_3 - h_4}{\eta_B} + h_3 [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$h_{4r} = -\frac{-23,904 \frac{kJ}{kg} - (-18,034) \frac{kJ}{kg}}{0,88} + (-23,904) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{4r} = -17,233 \frac{kJ}{kg}$$

Trabajo de la Turbina

Se halla el trabajo desarrollado por la turbina.

$$W_T = (h_1 - h_{2r}) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$W_T = \left(896,582 \frac{kJ}{kg} - 741,147 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$W_T = 155,435 \frac{kJ}{kg}$$

Potencia de la Turbina

Determinando la potencia de la turbina sabiendo que la $\dot{m} = 64,387 [kg/s]$

$$\dot{P}_T = \dot{m}(h_1 - h_{2r}) [kJ/s \text{ ó } kW] \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$\dot{P}_T = 64,387 \frac{kg}{s} * 155,435 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{P}_T = 10008,036 \frac{kJ}{s}$$

Calor transferido en el condensador

Se calcula el calor que transfiere el isobutano al agua.

$$\dot{P}_c = \dot{m}(h_{2r} - h_3) [kJ/s] \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$\dot{P}_c = 64,387 \frac{kg}{s} * (741,147 - (-23,904)) \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{P}_c = 49259,434 \frac{kJ}{s}$$

Trabajo de la Bomba

Se calcula el trabajo desarrollado en la bomba.

$$W_B = (h_{4r} - h_3) [kJ/kg] \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$W_B = \left(-17,233 \frac{kJ}{kg} - (-23,904) \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$W_B = 6,670 \frac{kJ}{kg}$$

Potencia de la Bomba

Se Determina la potencia en la bomba sabiendo que la $\dot{m} = 64,387[kg/s]$

$$\dot{P}_B = \dot{m}(h_{4r} - h_3)[kJ/s] \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$\dot{P}_B = 64,387 \frac{kg}{s} * 6,670 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{P}_B = 429,492 \frac{kJ}{s}$$

Calor transferido en el intercambiador de calor

Calculando el calor transferido entre el estado 1 y el estado 4 a una misma Presión.

$$\dot{Q}_{IC} = \dot{m}(h_1 - h_{4r}) [kJ/s] \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$\dot{Q}_{IC} = 64,387 \frac{kg}{s} * (896,582 \frac{kJ}{kg} - (-17,233) \frac{kJ}{kg})$$

$$\dot{Q}_{IC} = 58837,978 \frac{kJ}{s}$$

Potencia Neta

La Potencia Neta es la diferencia entre la potencia que genera la turbina de la central menos la potencia que consumen la bomba.

$$P_{neta} = P_T - P_B [kJ/s] \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$P_{neta} = (10008,036 - 429,492) \frac{kJ}{s}$$

$$P_{neta} = 9578,544 \frac{kJ}{s}$$

ó

$$P_{neta} = 9,5785 MW$$

Potencia Neta generada

Se calcula la Potencia Neta Generada considerando la eficiencia mecánica 0.87 y eficiencia de generación de 0.96.

$$P_{neta,G} = P_{neta} \cdot \eta_M \cdot \eta_G [kJ/s] \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$P_{neta,G} = 9,5785 MW * 0,87 * 0,96$$

$$P_{neta,G} = 8 MW$$

El Rendimiento Térmico de Planta

Indica el porcentaje de energía recibida por el fluido de trabajo en el intercambiador de Calor.

$$\eta_{planta} = \frac{(h_1 - h_{2r})}{(h_1 - h_{4r})} \quad \text{Ecuación (17)}$$

$$\eta_{planta} = \frac{155,435 \frac{kJ}{kg}}{913,815 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\eta_{planta} = 0,1701 * 100\%$$

$$\eta_{planta} = 17,01\%$$

Parámetros de la selección del condensador

Para la selección y diseño del condensador se pidió ayuda a la empresa EVAPCO la cual pidió los siguientes parámetros; cuadro 34.

Cuadro 34: Parámetros para el diseño y selección del condensador

Datos	Parámetro	Valor
Presion	P2=P3	0,65 bar
<i>t_{isobutano}</i>	<i>t₁</i> vapor sobrecalentado	39,55°C ó 312,7 K
	<i>t₂</i> liquido saturado	-22,58°C ó 250,571K
<i>Q_{cedido}</i>	<i>Q_c</i>	58 837,978 $\frac{kJ}{s}$

Fuente: Elaboración Propia.

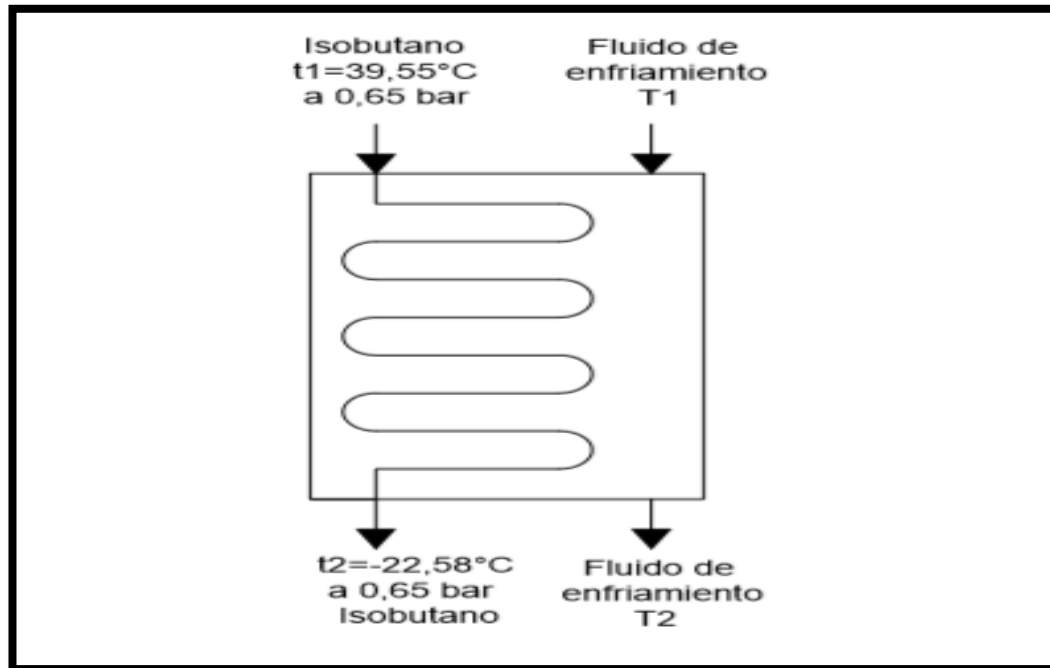


Fig. 24: Ilustración del condensador.
Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo para la selección del alternador

Se escogió la tensión nominal a la cual este generador trabajara de 10 kV, la potencia nominal que es de 8 MW y el factor de potencia escogido para la central es igual a $\cos(\varphi) = 0,85$.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{Ecuación (60)}$$

$$8 \cdot 10^6 \text{ W} = \sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV} \cdot 10^3 \cdot I \cdot 0,85$$

$$I = 543,39 \text{ A}$$

Cálculo de dimensión de tubería

Para realizar el cálculo de la tubería que sale de la bomba y se conecta con el tubo del subsuelo, se debe saber el valor numérico del caudal el cual es de $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$, la velocidad que es de $2,4 \text{ m/s}$.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} \text{ [m]} \quad \text{Ecuación (61)}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,21 \frac{m^3}{s}}{\pi * 2,4 \frac{m}{s}}}$$

$$d = 0,3338 \text{ m}$$

Se escogerá un tubo de acero al carbono de 14" calibre 30 con diámetro externo 0,3556m y diámetro interno 0,33655m el cual lo encontramos en el anexo 1, este tubo conecta la bomba con el tubo del subsuelo, se le denominará tubería "A".

Para encontrar el dimensionamiento de la tubería que conecta el tubo de salida del subsuelo con la entrada al intercambiador de calor, es necesario saber que tiene un caudal de $0,21 \frac{m^3}{s}$ y una velocidad de 2,4m/s.

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,21 \frac{m^3}{s}}{\pi * 10 \frac{m}{s}}}$$

$$d = 0,1635 \text{ m}$$

Se escogerá un tubo de acero al carbono de 8" calibre XXS con diámetro externo 0,21908m y diámetro interno 0,17305m el cual lo encontramos en el anexo 1, este tubo conecta el tubo del subsuelo con el intercambiador de calor y se le denominará tubería "B".

Para el cálculo de la tubería que conecta el intercambiador de calor con el tanque (almacén de agua blanda) y este con la bomba se debe tener en cuenta que el caudal es $0,21 \frac{m^3}{s}$ y que se tiene que encontrar la velocidad a través de la interpolación.

Velocidad a la entrada de la bomba	Velocidad a la salida de la bomba
0,3 m/s	1,2 m/s
X m/s	2,4 m/s
0,9 m/s	3 m/s

$$X = 0,7 \text{ m/s}$$

Luego se aplica la ecuación (61):

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,21 \frac{m^3}{s}}{\pi * 0,7 \frac{m}{s}}}$$

$$d = 0,618 \text{ m}$$

Se escogerá del anexo 12 un tubo de acero al carbono de 26" con espesor de 0,812 pulgadas, el cual tiene un diámetro externo 0,6604 m y un diámetro interno 0,6192m al cual se le denominara tubería "C"

Cálculo de dimensión de Tubería a partir de datos de la bomba

Se sabe que este cálculo se hace a la bomba que se encuentra dentro del ciclo organico rankine para hallar el diámetro de la tubería, por ello tenemos que encontrar el caudal con la ecuación (62) ya que se conoce los valores de salida de la bomba donde la presión es de 30 bar y la potencia hidráulica de $429,492 \frac{kJ}{s}$.

$$P_H = \frac{P \cdot Q}{\eta} [J/s] \quad \text{Ecuación (62)}$$

$$429,492 \frac{kJ}{s} = \frac{30 * 10^5 Pa * Q}{0,87}$$

$$Q = 0,13 \frac{m^3}{s}$$

Con la ecuación (29) hallamos la velocidad en función del área transversal, por lo tanto, para el diámetro de la tubería se toma del anexo 1 un valor de 0,33655m con lo cual encontraremos la velocidad y si se encuentra entre los parámetros que nos muestra el anexo 4, se llegara a la conclusión que el valor dado al diámetro de la tubería es el correcto.

$$Q = A \cdot V [m^3/s] \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$0,13 \frac{m^3}{s} = \pi * \frac{(0,33655m)^2}{4} \cdot V$$

$$V = 1,46 \text{ m/s}$$

El valor encontrado está dentro de los parámetros que se muestran en el anexo 4, con esto se puede deducir que el diámetro interno asumido es el adecuado, concluyendo que la tubería de acero al carbono el cual conecta la bomba con el intercambiador es de 14" calibre 30 con diámetro externo 0,3556m y diámetro interno 0,33655m el cual se puede observar en el anexo 1, a esta tubería se le denominamos tubería "D".

Para las tuberías que conectan el intercambiador con la turbina y esta con el condensador se tomara un diámetro de 0,1318m del anexo 1 y se aplicara la ecuación (29) para encontrar la velocidad el cual debe ser mayor o igual de 9 m/s, pero menor o igual de 30 m/s de acuerdo con el anexo 4, concluyendo que el valor del diámetro dado es el correcto, además se sabe que el caudal es de $0,13m^3/s$

$$Q = A \cdot V [m^3/s] \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$0,13 \frac{m^3}{s} = \pi * \frac{(0,1318m)^2}{4} \cdot V$$

$$V = 9,528 \text{ m/s}$$

El valor encontrado está dentro de los valores explicados con anterioridad (anexo 4), con esto se puede deducir que el diámetro interno dado es el adecuado. Se concluye que las dos tuberías de acero al carbono son de 6" calibre 160 con diámetro externo 0,16828m y diámetro interno 0,1318m el cual se puede observar en el anexo 1, además a esta tubería se le denominara tubería "E".

En el cálculo de la tubería que conecta el condensador con la bomba, se tendrá en cuenta que el caudal es $0,13 \frac{m^3}{s}$ y que se tiene que encontrar la velocidad a través de la interpolación.

Velocidad a la entrada de la bomba	Velocidad a la salida de la bomba
0,3 m/s	1,2 m/s
X m/s	1,4 m/s
0,9 m/s	3 m/s
X= 0,367 m/s	

Luego se aplica la ecuación (61):

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,13 \frac{m^3}{s}}{\pi * 0,367 \frac{m}{s}}}$$

$$d = 0,6716 m$$

Se escogerá un tubo de acero al carbono de 28” con espesor de 0,750 pulgada el cual tiene un diámetro externo 0,7112 m y diámetro interno 0,6731m como se puede observar en el anexo 12; a esta tubería se le denomina tubería “F”.

Cálculo del espesor del aislamiento térmico

Para la tubería del subsuelo de lado izquierdo se tiene los siguientes datos, cuadro 35:

Cuadro 35: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	0,3556m
Diámetro interno de la tubería	D_i	0,3366m
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	207,83°C ó 480,98K
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$	145°C ó 418,15 K
Conductividad térmica del material	$k_{del metal}$	$60,5 \frac{W}{m \cdot K}$
Coefficiente de transferencia de calor en interior	h_i	$7\,530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Coefficiente de transferencia de calor del geofluido	h_e	$700 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Fuente: Elaboración Propia.

Con estos datos se puede encontrar la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico con la ecuación (67):

$$q_{l.R} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{interno} \cdot h_{interno}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interno}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{del metal}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{exterior} \cdot h_{exterior}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

[W/m]

$$q_{L.R} = \frac{480,98K - 418,15K}{\frac{1}{2 * \pi * 0,1683m * 7530,12 \frac{W}{m^2.K}} + \frac{\ln\left(\frac{0,1778}{0,1683}\right)}{2 * \pi * 60,5 \frac{W}{m.K}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,1778m * 700 \frac{W}{m^2.K}}}$$

$$q_{L.R} = 40566,877 \frac{W}{m}$$

Después se debe hallar la Densidad de flujo de calor con la ecuación (68):

$$q = \frac{q_{L.R}}{\pi \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (68)}$$

$$q = \frac{40566,877 \frac{W}{m}}{\pi \cdot 0,3556m}$$

$$q = 36312,818 \frac{W}{m^2}$$

Hallado la Densidad de flujo de calor podemos calcular λ_B y así se procede a calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{0,3556m}{0,3366m} + \frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2.K} * 0,3366m} + \frac{1}{700 \frac{W}{m^2.K} * 0,3556m} = \frac{480,98K - 418,15K}{36312,818 \frac{W}{m^2} * 0,3556m}$$

$$\lambda_B = 60,50 \frac{W}{m.K}$$

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$d = 60,50 \frac{W}{m.K} * \left(\frac{480,98K - 418,15K}{36312,818 \frac{W}{m^2}} - \frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2.K}} - \frac{1}{700 \frac{W}{m^2.K}} \right)$$

$$d = 0,010m$$

De acuerdo con el anexo 13 el espesor de $0,010m$ se encuentra dentro de los valores recomendados para el aislamiento termico de fibra de vidrio.

Para la tubería "A" se tienen los siguientes datos, cuadro 36:

Cuadro 36: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	$0,3556m$
Diámetro interno de la tubería	D_i	$0,3366m$
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	$100^{\circ}C$ ó $373,15K$
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	$25^{\circ}C$ ó $298,15 K$
Conductividad térmica del material	$k_{del\ metal}$	$60,5 \frac{W}{m \cdot K}$
Coefficiente de transferencia de calor en interior	h_i	$7\ 530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Fuente: Elaboración Propia.

Primero se calcula el coeficiente de convección externa, para lo cual se debe saber si el flujo del fluido es laminar o turbulento:

$Diametro\ de\ la\ tubería^3 \cdot (T_{interior} - T_{ambiente})$

$(0,3556m)^3 \cdot (373,15K - 298,15K) = 3,372m^3K$ es menor de $10m^3K$ indicando que es flujo laminar y se aplicara la ecuación (64):

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(T_{interior} - T_{ambiente})}{Diametro\ de\ la\ tubería}} [W/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (64)}$$

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(373,15K - 298,15K)}{0,3556m}}$$

$$h_{convección} = 4,7636 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Luego se calcula el coeficiente de radiación externa:

$$h_{radiación} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (TK_{sup} + TK_{aire})(TK_{sup}^2 + TK_{aire}^2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

$[W/m^2 \cdot K]$

$$h_{radiación} = 0,25 * 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} * (373,15K + 298,15K) * ((373,15K)^2 + (298,15K)^2)$$

$$h_{radiación} = 2,1709 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con estos dos valores se puede encontrar la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico con la ecuación (67):

$$q_{L.R} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{interno} \cdot h_{interno}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interno}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{del\ metal}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{exterior} \cdot h_{exterior}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

$$q_{L.R} = \frac{373,15K - 298,15K}{\frac{1}{2 * \pi * 0,1683m * 7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{\ln\left(\frac{0,1778m}{0,1683m}\right)}{2 * \pi * 60,5 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,1778m * 6,9345 \frac{W}{m^2 \cdot K}}}$$

$$q_{L.R} = 579,803 \frac{W}{m}$$

Después se debe hallar la Densidad de flujo de calor con la ecuación (68):

$$q = \frac{q_{L.R}}{\pi \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (68)}$$

$$q = \frac{579,803 \frac{W}{m}}{\pi \cdot 0,3556m}$$

$$q = 519 \frac{W}{m^2}$$

Hallado la Densidad de flujo de calor podemos calcular λ_B y así se procede a calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{0,3556m}{0,3366m} + \frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,3366m} + \frac{1}{6,9345 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,3556m} = \frac{373,15K - 298,15K}{519 \frac{W}{m^2} * 0,3556m}$$

$$\lambda_B = 60,3149 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$d = 60,3149 \frac{W}{m \cdot K} * \left(\frac{373,15K - 298,15K}{519 \frac{W}{m^2}} - \frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}} - \frac{1}{6,9345 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \right)$$

$$d = 0,010m$$

De acuerdo con el anexo 13 el espesor de 0,010m se encuentra dentro de los valores recomendados para el aislamiento termico de fibra de vidrio.

En la tubería “B” se tiene los siguientes datos, cuadro 37:

Cuadro 37: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	0,21908m
Diámetro interno de la tubería	D_i	0,17305m
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	207,83°C ó 480,98K
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	25°C ó 298,15 K
Conductividad térmica del material	$k_{del\ metal}$	60,5 $\frac{W}{m \cdot K}$
Coefficiente de transferencia de calor en interior	h_i	7 530,12 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

Fuente: Elaboración Propia.

Se comenzará calculando el coeficiente de convección externa, para lo cual se debe saber si el flujo del fluido es laminar o turbulento:

$$Diametro\ de\ la\ tubería^3 \cdot (T_{interior} - T_{ambiente})$$

$$(0,21908m)^3 * (480,98K - 298,15K) = 1,923m^3K \text{ es menor de } 10m^3K$$

indicando que es flujo laminar y se aplicara la ecuación (64):

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(T_{interior} - T_{ambiente})}{Diametro\ de\ la\ tubería}} [W/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (64)}$$

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(480,98K - 298,15K)}{0,21908m}}$$

$$h_{convección} = 6,7185 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Luego se calcula el coeficiente de radiación externa:

$$h_{radiación} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (TK_{sup} + TK_{aire})(TK_{sup}^2 + TK_{aire}^2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

$$[W/m^2 \cdot K]$$

$$h_{radiación} = 0,25 * 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} * (480,98K + 298,15K) * ((480,98K)^2 + (298,15K)^2)$$

$$h_{radiación} = 3,5367 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con estos dos valores se puede hallar la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico con la ecuación (67):

$$q_{L,R} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{interno} \cdot h_{interno}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interior}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{del\ metal}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{exterior} \cdot h_{exterior}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

$$[W/m]$$

$$q_{L,R} = \frac{480,98K - 298,15K}{\frac{1}{2 * \pi * 0,0865m * 7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{\ln\left(\frac{0,1095m}{0,0865m}\right)}{2 * \pi * 60,5 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,1095m * 10,2552 \frac{W}{m^2 \cdot K}}}$$

$$q_{L,R} = 1282,166 \frac{W}{m}$$

Después se debe encontrar la Densidad de flujo de calor con la ecuación (68):

$$q = \frac{q_{L,R}}{\pi \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (68)}$$

$$q = \frac{1282,166 \frac{W}{m}}{\pi \cdot 0,21908m}$$

$$q = 1862,909 \frac{W}{m^2}$$

Hallado la Densidad de flujo de calor podemos calcular λ_B y así se procede a calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{0,21908m}{0,17305m} + \frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,17305m} + \frac{1}{10,2552 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,21908m} \\ = \frac{480,98K - 298,15 K}{1862,909 \frac{W}{m^2} * 0,21908m} \end{aligned}$$

$$\lambda_B = 55,85 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$d = 55,85 \frac{W}{m \cdot K} * \left(\frac{480,98K - 298,15 K}{1862,909 \frac{W}{m^2}} - \frac{1}{7530,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}} - \frac{1}{10,2552 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \right)$$

$$d = 0,028m$$

De acuerdo con el anexo 13 el espesor de $0,028m$ se encuentra dentro de los valores recomendados para el aislamiento termico de fibra de vidrio.

Para la tubería "C" se tienen los siguientes datos, cuadro 38:

Cuadro 38: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	0,6604m
Diámetro interno de la tubería	D_i	0,6192m
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	100°C ó 373,15K
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	25°C ó 298,15 K
Conductividad térmica del material	$k_{del\ metal}$	$60,5 \frac{W}{m.K}$
Densidad	ρ	$958,4 \frac{kg}{m^3}$
Velocidad de entrada	v	$0,7 \frac{m}{s}$
Viscosidad dinámica	μ	$0,000281 \frac{kg}{m.s}$
Capacidad Calorifica	C_p	$4\ 217 \frac{J}{kg.K}$
Conductividad Térmica	K	$0,6791 \frac{W}{m.K}$

Fuente: Elaboración Propia.

Inicialmente se calcula el coeficiente de convección externa, para lo cual se debe saber si el flujo del fluido externo es laminar o turbulento:

*Diámetro de la tubería*³ · ($T_{interior} - T_{ambiente}$)

$(0,6604m)^3 * (373,15K - 298,15K) = 21,601m^3K$ es mayor de $10m^3K$, este valor indica que es flujo turbulento se aplicara la ecuación (65):

$$h_{convección} = 1,21^3 \sqrt{(T_{interior} - T_{ambiente})} [W/m^2.K] \quad \text{Ecuación (65)}$$

$$h_{convección} = 1,21^3 \sqrt{(373,15K - 298,15K)}$$

$$h_{convección} = 5,103 \frac{W}{m^2.K}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de radiación externa:

$$h_{radiación} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (TK_{sup} + TK_{aire}) (TK_{sup}^2 + TK_{aire}^2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

$$[W/m^2.K]$$

$$h_{radiación} = 0,25 * 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} * (373,15K + 298,15K) * ((373,15K)^2 + (298,15K)^2)$$

$$h_{radiación} = 2,171 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para calcular la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico es necesario saber el valor del coeficiente de transferencia de calor en el interior, para ello aplicaremos las siguientes ecuaciones:

Número de Reynolds

$$R_e = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$R_e = \frac{0,7 \frac{m}{s} * 958,4 \frac{kg}{m^3} * 0,6192m}{0,0003 \frac{kg}{m * s}}$$

$$R_e = 1384696,32$$

Conociendo el número de Reynolds y sabiendo que es mayor a 10 000, se calculara el:

Número de Prandl

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$Pr = \frac{4217 \frac{J}{kg \cdot K} * 0,0003 \frac{kg}{m * s}}{0,6791 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$Pr = 1,86$$

Con estos datos se calculara el numero de Nusselt:

Número de Nusselt

$$N_u = 0,023 R_e^{0,8} Pr^{0,3} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$N_u = 0,023(1384696,32)^{0,8}(1,86)^{0,3}$$

$$N_u = 2268,116$$

Luego se calculara el Coeficiente de transferencia:

Coeficiente de transferencia de calor del agua blanda

$$h_{\text{Agua blanda}} = \frac{K_{\text{Isobutano}} \cdot Nu}{D_i} \text{ [kW/m}^2 \cdot \text{K]} \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$h_{\text{H}_2\text{O Blanda}} = \frac{0,6791 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} * 2268,116}{0,6192 \text{ m}}$$

$$h_{\text{H}_2\text{O Blanda}} = 2487,528 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Flujo de calor lineal del elemento cilíndrico

$$q_{L,R} = \frac{T_{\text{interna}} - T_{\text{externa}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{interno}} \cdot h_{\text{interno}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{exterior}}}{r_{\text{interior}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{del metal}}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{exterior}} \cdot h_{\text{exterior}}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

[W/m]

$$q_{L,R} = \frac{373,15\text{K} - 298,15\text{K}}{\frac{1}{2 * \pi * 0,3096\text{m} * 2487,528 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} + \frac{\ln\left(\frac{0,3302\text{m}}{0,3096\text{m}}\right)}{2 * \pi * 60,5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,3302\text{m} * 7,274 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}}$$

$$q_{L,R} = 1125,469 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Después se debe calcular la Densidad de flujo de calor con la ecuación (68):

$$q = \frac{q_{L,R}}{\pi \cdot D_a} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{Ecuación (68)}$$

$$q = \frac{1125,469 \frac{\text{W}}{\text{m}}}{\pi \cdot 0,6604\text{mm}}$$

$$q = 542,471 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Hallado la Densidad de flujo de calor podemos calcular λ_B y así se procede a calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{0,6604m}{0,6192m} + \frac{1}{2487,528 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,6192m} + \frac{1}{7,274 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,6604m} \\ = \frac{375,15K - 298,15 K}{542,471 \frac{W}{m^2} * 0,6604m} \end{aligned}$$

$$\lambda_B = 60,506 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$d = 60,506 \frac{W}{m \cdot K} * \left(\frac{375,15K - 298,15 K}{542,471 \frac{W}{m^2}} - \frac{1}{2487,528 \frac{W}{m^2 \cdot K}} - \frac{1}{7,274 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \right)$$

$$d = 0,023m$$

De acuerdo con el anexo 13 el espesor de $0,023m$ se encuentra dentro de los valores recomendados para el aislamiento termico de fibra de vidrio.

En la tubería "D" se cuenta con los siguientes datos, cuadro 39:

Cuadro 39: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	0,3556m
Diámetro interno de la tubería	D_i	0,3366m
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	-22,58°C ó 250,571K
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	25°C ó 298,15 K

Fuente: Elaboración Propia.

Para este tipo de tubería donde la temperatura interna es menor que la de ambiente se considera un aislante de lana mineral con espesor de 70mm según el cuadro 40:

Cuadro 40: Espesores mínimos de aislamiento (mm) de tuberías y accesorios

Diámetro exterior (mm)	Temperatura máxima del fluido (°C)		
	$T > -10^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C} \leq T < 0^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C} \leq T < 10^{\circ}\text{C}$
$D \leq 35$	Espesor de 50mm	Espesor de 40mm	Espesor de 40mm
$35 \leq D \leq 60$	Espesor de 60mm	Espesor de 50mm	Espesor de 40mm
$60 < D \leq 90$	Espesor de 60mm	Espesor de 50mm	Espesor de 50mm
$90 < D$	Espesor de 70mm	Espesor de 60mm	Espesor de 50mm

Fuente: ISOVER, Empresa productora de aislamiento industrial

Para mayor protección a la barrera de vapor y al aislamiento coloque una lámina de aluminio o galvanizada del calibre 24 con un espesor de 0,6mm.

Para la tubería “E” se debe tener dos tipos de espesor a causa de la variación de temperatura interna en los diferentes tramos de la tubería, en el tramo que conecta el intercambiador con la turbina se tienen los siguientes datos, cuadro 41:

Cuadro 41: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	0,16828m
Diámetro interno de la tubería	D_i	0,1318m
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	150°C ó 423,15K
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	25°C ó 298,15 K
Conductividad térmica del material	$k_{del\ metal}$	$60,5 \frac{W}{m \cdot K}$
Densidad	ρ	$72,029 \frac{kg}{m^3}$
Velocidad de entrada	v	$9,528 \frac{m}{s}$
Viscosidad dinámica	μ	$0,00001879 \frac{kg}{m \cdot s}$
Capacidad Calorífica	C_p	$2\ 960,459 \frac{J}{kg \cdot K}$
Conductividad Térmica	K	$0,0493 \frac{W}{m \cdot K}$

Fuente: Elaboración Propia.

Se empezará calculando el coeficiente de convección externa, para lo cual se debe saber si el flujo del fluido externo es laminar o turbulento:

$Diametro\ de\ la\ tubería^3 \cdot (T_{interior} - T_{ambiente})$

$(0,16828m)^3 \cdot (423,15K - 298,15K) = 0,5957m^3K$ es menor de $10m^3K$, este valor indica que es flujo laminar se aplicara la ecuación (64):

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(T_{interior} - T_{ambiente})}{Diametro\ de\ la\ tubería}} [W/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (64)}$$

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{423,15K - 298,15K}{0,16828m}}$$

$$h_{convección} = 6,5257 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de radiación externa:

$$h_{radiación} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (TK_{sup} + TK_{aire})(TK_{sup}^2 + TK_{aire}^2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

$[W/m^2 \cdot K]$

$$h_{radiación} = 0,25 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot (423,15K + 298,15K) \cdot ((423,15K)^2 + (298,15K)^2)$$

$$h_{radiación} = 2,740 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para realizar el cálculo la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico es necesario saber el valor del coeficiente de transferencia de calor en el interior, para ello aplicaremos las siguientes ecuaciones:

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$Re = \frac{9,528 \frac{m}{s} \cdot 72,029 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,1318m}{0,00001879 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 4813907,755$$

Conociendo el número de Reynolds y sabiendo que es mayor a 10 000, se calculara el:

Número de Prandl

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$Pr = \frac{2960,458 \frac{J}{kg \cdot K} * 0,00001879 \frac{kg}{m \cdot s}}{0,0493 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$Pr = 1,13$$

Con estos datos se calculara el numero de Nusselt:

Número de Nusselt

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,3} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$Nu = 0,023(4813907,755)^{0,8}(1,13)^{0,3}$$

$$Nu = 5292,362$$

Luego se calculara el Coeficiente de transferencia:

Coeficiente de transferencia de calor del Isobutano

$$h_{Isobutano} = \frac{K_{Isobutano} \cdot Nu}{D_i} [kW/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$h_{Isobutano} = \frac{0,0493 \frac{W}{m \cdot K} * 5292,362}{0,1318m}$$

$$h_{Isobutano} = 1979,617 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Flujo de calor lineal del elemento cilíndrico

$$q_{l.R} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{interno} \cdot h_{interno}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interno}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{del\ metal}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{exterior} \cdot h_{exterior}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

$$[W/m]$$

$$q_{L,R} = \frac{423,15K - 298,15K}{\frac{1}{2 * \pi * 0,0659m * 1979,617 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{\ln\left(\frac{0,08414m}{0,0659m}\right)}{2 * \pi * 60,5 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,08414m * 9,2657 \frac{W}{m^2 \cdot K}}}$$

$$q_{L,R} = 606,7723 \frac{W}{m}$$

Después se debe calcular la Densidad de flujo de calor con la ecuación (68):

$$q = \frac{q_{L,R}}{\pi \cdot D_a} [W/m^2] \quad \text{Ecuación (68)}$$

$$q = \frac{606,7723 \frac{W}{m}}{\pi \cdot 0,16828m}$$

$$q = 1147,7396 \frac{W}{m^2}$$

Hallado la Densidad de flujo de calor podemos calcular λ_B y así se procede a calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{0,16828m}{0,1318m} + \frac{1}{1979,617 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,1318m} + \frac{1}{9,2657 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,16828m}$$

$$= \frac{423,15K - 298,15K}{1147,7396 \frac{W}{m^2} * 0,16828m}$$

$$\lambda_B = 60,498 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$d = 60,498 \frac{W}{m \cdot K} * \left(\frac{423,15K - 298,15K}{1147,7396 \frac{W}{m^2}} - \frac{1}{1979,617 \frac{W}{m^2 \cdot K}} - \frac{1}{9,2657 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \right)$$

$$d = 0,029m$$

De acuerdo con el anexo 13 el espesor de $0,029m$ se encuentra dentro de los valores recomendados para el aislamiento termico de fibra de vidrio.

Para el tramo de la tubería “E” que conecta la turbina con el condensador, se tiene los siguientes datos, cuadro 42:

Cuadro 42: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	$0,16828m$
Diámetro interno de la tubería	D_i	$0,1318m$
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	$39,5^\circ C$ ó $312,65 K$
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	$25^\circ C$ ó $298,15 K$
Conductividad térmica del material	$k_{del metal}$	$60,5 \frac{W}{m \cdot K}$
Densidad	ρ	$531,328 \frac{kg}{m^3}$
Velocidad de entrada	v	$9,528 \frac{m}{s}$
Viscosidad dinámica	μ	$0.00013041 \frac{kg}{m \cdot s}$
Capacidad Calorifica	C_p	$1\,747,275 \frac{J}{kg \cdot K}$
Conductividad Térmica	K	$0.08951 \frac{W}{m \cdot K}$

Fuente: Elaboración Propia.

Se empezará calculando el coeficiente de convección externa, para lo cual se debe saber si el flujo del fluido externo es laminar o turbulento:

$$Diametro\ de\ la\ tubería^3 \cdot (T_{interior} - T_{ambiente})$$

$(0,16828m)^3 * (312,7K - 298,15K) = 0,069m^3K$ es menor de $10m^3K$, este valor indica que es flujo laminar se aplicara la ecuación (64):

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{(T_{interior} - T_{ambiente})}{Diametro\ de\ la\ tubería}} [W/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (64)}$$

$$h_{convección} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{312,65K - 298,15K}{0,16828m}}$$

$$h_{convección} = 3,808 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de radiación externa:

$$h_{radiación} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (TK_{sup} + TK_{aire})(TK_{sup}^2 + TK_{aire}^2) \quad \text{Ecuación (66)}$$

$$[W/m^2 \cdot K]$$

$$h_{radiación} = 0,25 * 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} * (312,65K + 298,15K) * ((312,65K)^2 + (298,15K)^2)$$

$$h_{radiación} = 1,616 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para realizar el cálculo la densidad de flujo de calor lineal del elemento cilíndrico es necesario saber el valor del coeficiente de transferencia de calor en el interior, para ello aplicaremos las siguientes ecuaciones:

Número de Reynolds

$$R_e = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$R_e = \frac{9,528 \frac{m}{s} * 531,328 \frac{kg}{m^3} * 0,1318m}{0,00013041 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$R_e = 5116404,591$$

Conociendo el número de Reynolds y sabiendo que es mayor a 10 000, se calculara el:

Número de Prandl

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$Pr = \frac{1747,275 \frac{J}{kg \cdot K} * 0.00013041 \frac{kg}{m \cdot s}}{0.08951 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$Pr = 2,55$$

Con estos datos se calculara el numero de Nusselt:

Número de Nusselt

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$Nu = 0,023(5116404,591)^{0,8}(2,55)^{0,3}$$

$$Nu = 7093,52$$

Luego se calculara el Coeficiente de transferencia:

Coeficiente de transferencia de calor del agua blanda

$$h_{Isobutano} = \frac{K_{Isobutano} \cdot Nu}{D_i} [kW/m^2 \cdot K] \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$h_{Isobutano} = \frac{0.08951 \frac{W}{m \cdot K} * 7093,52}{0,1318m}$$

$$h_{Isobutano} = 4817,458 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Flujo de calor lineal del elemento cilíndrico

$$q_{l.R} = \frac{T_{interna} - T_{externa}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{interno} \cdot h_{interno}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interior}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{del\ metal}} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{exterior} \cdot h_{exterior}}} \quad \text{Ecuación (67)}$$

[W/m]

$$q_{L,R} = \frac{312,65K - 298,15K}{\frac{1}{2 * \pi * 0,0659m * 4817,458 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{\ln\left(\frac{0,08414m}{0,0659m}\right)}{2 * \pi * 60,5 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{2 * \pi * 0,08414m * 5,424 \frac{W}{m^2 \cdot K}}}$$

$$q_{L,R} = 41,412 \frac{W}{m}$$

Después se debe calcular la Densidad de flujo de calor con la ecuación (68):

$$q = \frac{q_{L,R}}{\pi \cdot D_a} [W/m^2] \quad \text{Ecuación (68)}$$

$$q = \frac{41,412 \frac{W}{m}}{\pi \cdot 0,16828m}$$

$$q = 78,333 \frac{W}{m^2}$$

Hallado la Densidad de flujo de calor podemos calcular λ_B y así se procede a calcular el espesor del aislamiento térmico:

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{D_a}{D_i} + \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{1}{h_a \cdot D_a} = \frac{(\theta_M - \theta_L)}{q \cdot D_a} \quad \text{Ecuación (69)}$$

$$\frac{1}{2\lambda_B} \cdot \ln \frac{0,16828m}{0,1318m} + \frac{1}{4817,458 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,1318m} + \frac{1}{5,424 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,16828m}$$

$$= \frac{312,65K - 298,15K}{78,333 \frac{W}{m^2} * 0,16828m}$$

$$\lambda_B = 43,159 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$d = \lambda_B \left(\frac{(\theta_M - \theta_L)}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) [m] \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$d = 43,159 \frac{W}{m \cdot K} * \left(\frac{312,65K - 298,15 K}{78,333 \frac{W}{m^2}} - \frac{1}{4817,458 \frac{W}{m^2 \cdot K}} - \frac{1}{5,424 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \right)$$

$$d = 0,023m$$

De acuerdo con el anexo 13 el espesor de $0,023m$ se encuentra dentro de los valores recomendados para el aislamiento termico de fibra de vidrio.

Para la ultima tubería “F” se tienen los siguientes datos, cuadro 43:

Cuadro 43: Datos para calcular el espesor del aislamiento

Diámetro externo de la tubería	D_a	0,7112m
Diámetro interno de la tubería	D_i	0,6731m
Temperatura del interior de la tubería	$T_{interior}$ ó TK_{sup}	-22,58°C ó 250,571K
Temperatura del ambiente	$T_{externa,ambiente}$ ó TK_{aire}	25°C ó 298,15 K

Fuente: Elaboración Propia.

Para este tipo de tubería donde la temperatura interna es menor que la de ambiente se considera un aislante de lana mineral con espesor de 70mm según el cuadro 44 el cual fue expuesto anteriormente:

Cuadro 44: Espesores mínimos de aislamiento (mm) de tuberías y accesorios

Diámetro exterior (mm)	Temperatura máxima del fluido (°C)		
	$T > -10^{\circ}C$	$-10^{\circ}C \leq T < 0^{\circ}C$	$0^{\circ}C \leq T < 10^{\circ}C$
$D \leq 35$	Espesor de 50mm	Espesor de 40mm	Espesor de 40mm
$35 \leq D \leq 60$	Espesor de 60mm	Espesor de 50mm	Espesor de 40mm
$60 < D \leq 90$	Espesor de 60mm	Espesor de 50mm	Espesor de 50mm
$90 < D$	Espesor de 70mm	Espesor de 60mm	Espesor de 50mm

Fuente: ISOVER, Empresa productora de aislamiento industrial

Para mayor protección a la barrera de vapor y al aislamiento coloque una lámina de aluminio o galvanizada del calibre 24 con un espesor de 0,6mm.

3.4 Dimensionar la Central Geotérmica

Se realizará un cuadro en el cual se especifica la marca, modelo y dimensión de los componentes que se usará en la central, luego se realizará un plano de ubicación de cada componente en el área donde se ubicará la central.

Cuadro 45: Descripción de Cada Equipo de la Central Geotérmica

Equipos	Marca	Modelo	Dimensiones
Tubería de Acero al Carbono	adolphus	6" SCH 160 8" SCH XXS 14" SCH 30	6 metros de Longitud
	COVALCO	26" con espesor de 0,812" 28" con espesor de 0,750"	6 metros de Longitud
Aislante térmico	OWENS CORNING	0,010m espesor 0,023m espesor 0,028m espesor 0,029m espesor	0,9144 metros de Longitud
	ISOVER SAINT-GOBAIN	0,07 m espesor	3 metros de Longitud
Plancha de aluminio	Aluminios Laminado Perú SAC	Calibre 24 de 0,06mm	1,5mx3m
Válvula	adolphus	Válvula compuerta acero al carbono A216	14 pulgadas 28 pulgadas
Accesorios de tuberías	adolphus	Codo 90° Codo reductor 90°	6 pulgadas 8 pulgadas 14 pulgadas 26 pulgadas 28 pulgadas
		Reductor	2"x14" /2"x26" 14"x28"/2"x14"
Intercambiador de Calor	Standard xchange a xylem brand	Century C500	Área del intercambiador: 11 7,446 m ² Número de tubos: 276
Turbina y generador	SIEMENS	SST-100	Largo: 5,6m Ancho: 1,6m Alto: 2,2m
Condensador	EVAPCO	Diseño de EVAPCO	Diseño de EVAPCO
Torre de Enfriamiento	EVAPCO	Diseño de EVAPCO	Diseño de EVAPCO
Bomba	OMEL	HDRP	2"x 1"x 10" C
Tanque del Isobutano	Diseño propio	Diseño propio	Volumen: 100,232 m ³
Tanque del agua blanda	Diseño propio	Diseño propio	Volumen: 747,488 m ³

Fuente: Elaboración Propia guiado de anexo 1,12,13, 14,15,16,17

Plano del dimensionamiento de los equipos de la central geotérmica se encuentra en el anexo 19 y 20.

3.5 Determinar la evaluación económica del dimensionamiento de la Central Geotérmica

Para realizar la evaluación económica del dimensionamiento de la central, primero se deberá conocer si es posible inyectar al SEIN la potencia que generara (Marco Legal), después se realizara un análisis de inversión, costo del kW.h, precio de venta del kW.h, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y por último Periodo de Retorno de la inversión (PRI).

3.5.1 Análisis de la Inversión

Se Realizará un primer cuadro basado en los costos de cada fase de desarrollo de la Central Geotérmica, después un segundo cuadro basado en el costo de los elementos de la Central y por último un tercer cuadro donde se describirán los gastos que tiene la central cada año.

➤ Cuadro de costos de cada fase de desarrollo de la Central Geotérmica:

Cuadro 46: Descripción de Inversión para el Reconocimiento, Exploración e Instalación

Fases de Desarrollo	Descripción	Monto en dólares
Reconocimiento	Estudios Geológicos	160 000,00
	Estudios geofísicos	160 000,00
	Estudios Geoquímicos	100 000,00
Exploración	Autorización	-
	Perforación de pozo Exploratorio	55 384,62
Instalación	Concesión	107 829,15
	Perforación de pozo Productor	300 000,00
	Obras Civiles	165 080,00
	Mano De Obra	200 000,00
	Transporte	125 000,00
	Montaje E instalación	165 080,00
Costos de la fase de desarrollo Total		1 538 373,77

Fuente: Elaboración Propia.

➤ Cuadro de costos de cada elemento de la Central Geotérmica:

Cuadro 47: Costos de los elementos de la Central Geotérmica

Elementos de la central Geotérmica	Cantidad	Costo Unitario En dólares	Costo Total en dólares
Tubería de Acero al Carbono	3 Unidades de 6"	21,05	63,15
	2 Unidades de 8"	42,11	84,22
	1003 Unidades de 14"	52,63	52 787,89
	8 Unidades de 26"	66,67	533,36
	2 Unidades de 28"	78,95	157,90
Aislante térmico	6582 Unidades 0,010m	4,43	29 158,26
	14 Unidades 0,023m	10,19	142,66
	14 Unidades 0,028m	12,40	173,60
	7 Unidad 0,029m	12,85	89,95
	7 Unidades 0,07m	31,01	217,07
Plancha de aluminio	7 Unidades	54,00	378,00
Válvula	9 Válvulas	20,91	188,19
Accesorios de tuberías	17 Codos 90° 1 Codo reductor 90°	9,35	168,30
	8 Reductores	7,50	60,00
Intercambiador de calor	1 unidad	306 821,70	261 821,70
Turbina y Generador	1 Unidad	528 162,56	506 162,56
Condensador	1 Unidad	185 000,00	165 000,00
Torre de enfriamiento	1 Unidad	20 000,00	20 000,00
Bomba	2 Unidades	12 670,00	25 340,00
Agua Blanda	694,096 m^3	21,89	15 192,00
Isobutano	93,072 m^3	42,73	3 977,39
Tanque del Isobutano	1 Unidad	1 000,00	1 000,00
Tanque del Agua Blanda	6 Unidad	1 200,00	7 200,00
Costo total de los elementos de la central Geotérmica			1 089 896,20
Costo total de Inversión			2 628 269,97

Fuente: Elaboración Propia.

➤ Cuadro de descripción de gastos al año:

Cuadro 48: Descripción de gastos al año

Descripción de Gastos	Monto (US\$/Año)
Personal Operación de Planta	61 538,46
Mantenimiento	100 329,52
Administración y Gastos Generales	20 000,00
Impuestos	31 504,55
Gasto total anual	213 372,53

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.2 Costo de Generación del kW.h

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{i + Mt}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E}{(1+r)^t}} \quad \text{Ecuación (60)}$$

Donde:

$t = 20$ Años.

$i = \$ 2\,628\,269,97$

$Mt = \$ 213\,372,53$

$E = 67\,200\,000$ kW.h (trabaja 24 horas y 350 días al año).

$r = 0,1$

$$LCOE = \frac{\$}{\text{kW.h}} 0,0423 \quad \text{ó} \quad LCOE = \frac{\text{s./}}{\text{kW.h}} 0,1434$$

3.5.3 Precio de venta de generación de energía eléctrica

La recuperación del dinero invertido en la construcción de la central se efectuará en base a la venta de energía que realizará el SEIN a un precio de

$\frac{\text{s./}}{\text{kW.h}} 0,1521$ el cual se observa en el anexo 18.

➤ Valor Actual Neto (VAN):

$$VAN = \$ 1\,804\,021,89$$

➤ Tasa Interna de Retorno (TIR):

$$TIR = 18\%$$

IV. Conclusiones

- En la descripción del primer objetivo se puede observar que en el periodo 2014 la mayor generación de energía eléctrica la efectuó las centrales renovables y la mayor potencia efectiva la realizó las centrales termoeléctricas en cambio en el periodo 2016 la máxima generación de energía eléctrica y de potencia efectiva la desempeño las centrales no renovables lo cual indica que existe una baja diversificación de la matriz energética y una mayor dependencia hacia las centrales no renovables.

- El área de Fuente Viscachuni de la Zona de Crucero tiene las mejores cualidades para instalar la central geotérmica debido a que en sus profundidades cuenta con aguas maduras las cuales se encuentran en equilibrio químico permitiendo que la medición de temperatura sea más exacta y constante.

- Se usó como fluido de trabajo el Isobutano por ser el más apropiado, debido a que en comparación del Isopentano, este genera mayor potencia eléctrica bajo los mismos parámetros, aunque el Isobutano es un refrigerante inflamable presenta excelentes características ambientales, es decir no afecta a la capa de ozono.

- De acuerdo al análisis económico, el dimensionamiento de la central es viable por los resultados que se han obtenido en el valor actual neto el cual es positivo y la tasa interna de retorno cuyo valor es 18% mayor al interés de 10%.

V. Recomendaciones

- Para incrementar la potencia generada será necesario que el flujo másico aumente lo cual con lleva a que el calor cedido en el intercambiador sea mucho mayor por ello será necesario aumentar la velocidad del agua blanda al entrar al subsuelo.

- El rendimiento de la central puede alcanzar hasta un 20% cuando se dispone de una fuente de calor de alta temperatura, sin embargo, queda un 80% como energía térmica el cual puede ser utilizado en distintas aplicaciones como la climatización.

- Para incrementar la eficiencia puede utilizarse un precalentador entre la turbina y el condensador para precalentar el Isobutano, el cual entra con la presión de salida de la turbina, además se sabe que la mínima presión de trabajo es de 0,5 bar ya que para presiones menores no existen tablas.

- Se debe realizar mantenimientos preventivos y corrosivos 3 a 4 días por año.

VI. Referencias

- [1] Ministerio de Energia y Minas, «Plan Energético Nacional 2014-2025,» 2014.
- [2] P. G. Aita, «Perú Potencial Energético: Propuestas y Desafíos,» *Círculo de Derecho Administrativo*, n° 16, p. 219, 2016.
- [3] P. G. Aita, «Perú Potencial Energético: Propuestas y Desafíos,» *Círculo de Derecho Administrativo*, n° 16, pp. 220-221, 2016.
- [4] P. G. Aita, «Perú Potencial Energético: Propuestas y Desafíos,» *Círculo de Derecho Administrativo*, n° 16, pp. 223-224, 2016.
- [5] M. Sander, «Geothermal Energy Development in Latin America and the Caribbean and the Role of International Development Partners,» Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne-Australia, 2015.
- [6] J. R. Estévez Salas, «GEOTHERMAL POWER PLANT PROJECTS IN CENTRAL AMERICA: TECHNICAL AND FINANCIAL FEASIBILITY ASSESSMENT MODEL,» MSc. Thesis, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Reykjavík, Iceland, 2012.
- [7] INGEMMET, «Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 58 Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región de Moquegua,» Lima-Peru, 2014.
- [8] L. F. C. Zapata, «DISEÑO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 50MW,» Tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, Lima-Perú, 2007.
- [9] J. G. Velasco, Energías renovables, Barcelona: REVERTE, 2009.
- [10] J. R. E. Salas, «GEOTHERMAL POWER PLANT PROJECTS IN CENTRAL AMERICA: TECHNICAL AND FINANCIAL FEASIBILITY ASSESSMENT MODEL,» *GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME*, n° 4, p. 15, 2012.
- [11] S. Caixia, «Feasibility Study of Geothermal Utilization of Yangbajain Field in Tibet Autonomous Region, P.R.CHINA,» MSc. Thesis, UNITED NATIONS UNIVERSITY, Reykjavik-Islandia, 2008.
- [12] P. Valdimarsson, «Geothermal Power Plant Cycles and Main Components,» United Nations University-Geothermal Training Programme, Santa Tecla, El Salvador, 2011.
- [13] J. R. E. Salas, «Geothermal Power Plant Projects in Central America: Technical and Financial Feasibility Assessment Model,» MSc. Thesis, University of Iceland, Reykjavík, 2012.
- [14] P. Valdimarsson, «Geothermal Power Plant Cycles and Main Components,» United Nations University-Geothermal Training Programme, Santa Tecla, El Salvador, 2011.
- [15] S. Caixia, «Feasibility Study of Geothermal Utilization of Yangbajain Field in Tibet Autonomous Region, P.R.CHINA,» MSc. Thesis, UNITED NATIONS UNIVERSITY, Reykjavik-Islandia, 2008.
- [16] E. Ramirez Pintado y C. Pinedo Mines, «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, Nuevo Chimbote - Peru, 2015.

- [17] P. Valdimarsson, «Geothermal Power Plant Cycles and Main Components,» United Nations University-Geothermal Training Programme, Santa Tecla, El Salvador, 2011.
- [18] E. Ramirez Pintado y C. Pinedo Mines, «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, Nuevo Chimbote - Peru, 2015.
- [19] A. I. GUTIÉRREZ JIMÉNE, «Modelación de un Intercabrador de Calor Vertical Tipo "U" Utilizado en Sistemas de Enfriamiento Aprovechando el Frio del Subsuelo-Edición Única,» Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey- Mexico, 2003.
- [20] Y. Cengel, Transferencia De Calor y Masa, Mexico D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V., 2007.
- [21] O. A. Jaramillo, «INTERCAMBIADORES DE CALOR,» Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, 2007.
- [22] COES, «Estadísticas Anuales,» <http://www.coes.org.pe/Portal/Publicaciones/Estadisticas/>, 2016.
- [23] Ministerio de Energia y Minas, «DECRETO LEGISLATIVO N° 1002,» Lima, 2008.
- [24] COES, «ESTADO ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA DEL SEIN,» <http://www.coes.org.pe/Portal/Publicaciones/Estadisticas/>, 2016.
- [25] COES, «ESTADÍSTICA RELEVANTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO NACIONAL,» *ESTADÍSTICA DE OPERACIÓN 2014*, p. 1, 2014.
- [26] COES, «ESTADÍSTICA RELEVANTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO NACIONAL,» *ESTADÍSTICA DE OPERACIÓN 2016*, p. 11, 2016.
- [27] INGEMMET, «GENERALIDADES,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, p. 3, 2014.
- [28] INGEMMET, «CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS GEOTERMALES,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, pp. 17,19,27,29, 2014.
- [29] INGEMMET, «METODOLOGIA,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, p. 11, 2014.
- [30] INGEMMET, «METODOLOGIA,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, p. 12, 2014.
- [31] INGEMMET, «RESUMEN,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, p. 2, 2014.
- [32] INGEMMET, «CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS GEOTERMALES,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y*

- Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, pp. 38,49,58,61, 2014.
- [33] INGEMMET, «CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS GEOTERMALES,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, pp. 79,88,97,102, 2014.
- [34] INGEMMET, «CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS GEOTERMALES,» *Boletion Serie C: Geodinamica e Ingenieria Geologica N° 58 Caracterizacion y Evaluacion del Potencial Geotermico de la Region de Moquegua*, pp. 117,121, 2014.
- [35] V. V. R. Vicentina Cruz Puccara, «Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región de Moquegua.,» *Boletin Serie C*, 2014.
- [36] S. Caixia, «Feasibility Study of Geothermal Utilization of Yangbajain Field in Tibet Autonomous Region, P.R.CHINA,» MSc. Thesis, UNITED NATIONS UNIVERSITY, Reykjavik-Islandia, 2008.
- [37] J. R. Estevez Salas, «Geothermal Power Plant Projects in Central America: Technical and Financial Feasibility Assessment Model,» MSc thesis, United Nations university Geothermal Training Programme, Reykjavík, Iceland, 2012.
- [38] J. G. Clarke, «Optimal design of geothermal power plants,» thesis, Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia, 2014.
- [39] P. Valdimarsson, «Geothermal Power Plant Cycles and Main Components,» United Nations University-Geothermal Training Programme, Santa Tecla, El salvador, 2011.
- [40] OSINERGMIN, «Generación Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables,» 2014.

VII. Anexos

ANEXO 1: Tabla de dimensiones de la tubería de acero al carbón enterrada en el subsuelo.

Tecnituberías		Importadores - Distribuidores						
ESPECIFICACIONES TUBERIA LINE PIPE								
Diámetro Nominal	Cédula Calibre	Diámetro Ext.		Diámetro Int.		Espesor		Peso Kg x Mt
		Pulg.	m.m.	Pulg.	m.m.	Pulg.	m.m.	
4"	40	4.500"	114.30	4.026"	102.26	0.237"	6.02	16.057
	80	4.500"	114.30	3.826"	97.18	0.337"	8.56	22.293
	120	4.500"	114.30	3.625"	92.08	0.438"	11.12	28.290
	160	4.500"	114.30	3.428"	87.33	0.531"	13.19	33.498
	XXS	4.500"	114.30	3.152"	80.06	0.674"	17.12	40.980
5"	40	5.563"	141.30	5.047"	128.19	0.258"	6.55	21.757
	80	5.563"	141.30	4.813"	122.25	0.375"	9.53	30.924
	120	5.563"	141.30	4.563"	115.90	0.500"	12.70	40.240
	160	5.563"	141.30	4.313"	109.55	0.625"	15.88	49.050
	XXS	5.563"	141.30	4.063"	103.20	0.750"	19.05	57.362
6"	40	6.625"	168.28	6.065"	154.05	0.280"	7.11	28.230
	80	6.625"	168.28	5.761"	146.33	0.432"	10.97	42.517
	120	6.625"	168.28	5.501"	139.73	0.562"	14.27	54.154
	160	6.625"	168.28	5.189"	131.80	0.718"	18.24	67.414
	XXS	6.625"	168.28	4.897"	124.38	0.864"	21.95	79.102
8"	20	8.625"	219.08	8.125"	206.28	0.250"	6.35	33.275
	30	8.625"	219.08	8.071"	205.00	0.277"	7.04	36.758
	40	8.625"	219.08	7.981"	202.72	0.322"	8.18	38.022
	60	8.625"	219.08	7.813"	198.45	0.406"	10.31	53.038
	80	8.625"	219.08	7.625"	193.68	0.500"	12.70	64.571
	100	8.625"	219.08	7.439"	188.95	0.593"	15.06	75.703
	120	8.625"	219.08	7.189"	182.60	0.718"	18.24	90.227
	140	8.625"	219.08	7.001"	177.83	0.812"	20.62	100.838
	160	8.625"	219.08	6.875"	174.63	0.875"	22.23	100.761
XXS	8.625"	219.08	6.813"	173.05	0.906"	23.01	111.151	
10"	20	10.750"	273.05	10.250"	260.35	0.250"	6.35	41.725
	30	10.750"	273.05	10.136"	257.45	0.307"	7.80	50.955
	40	10.750"	273.05	10.020"	254.51	0.365"	9.27	60.241
	60	10.750"	273.05	9.750"	247.65	0.500"	12.70	81.402
	80	10.750"	273.05	9.564"	242.93	0.593"	15.06	95.733
	100	10.750"	273.05	9.314"	236.58	0.718"	18.24	114.484
	120	10.750"	273.05	9.064"	230.23	0.843"	21.41	132.744
	140	10.750"	273.05	8.750"	222.25	1.000"	25.40	154.962
	160	10.750"	273.05	8.500"	215.90	1.125"	28.98	172.106
12"	20	12.750"	323.85	12.250"	311.15	0.250"	6.35	69.675
	30	12.750"	323.85	12.090"	307.09	0.330"	8.36	65.137
	40	12.750"	323.85	11.938"	303.23	0.406"	10.31	79.661
	60	12.750"	323.85	11.626"	295.30	0.562"	14.27	108.874
	80	12.750"	323.85	11.376"	288.95	0.687"	17.45	131.717
	100	12.750"	323.85	11.064"	281.03	0.843"	21.41	159.531
	120	12.750"	323.85	10.750"	273.05	1.000"	25.40	186.749
	140	12.750"	323.85	10.500"	266.70	1.125"	28.58	207.866
	160	12.750"	323.85	10.126"	257.20	1.312"	33.32	238.507
14"	10	14.000"	355.60	13.500"	342.90	0.250"	6.35	54.630
	20	14.000"	355.60	13.373"	339.75	0.312"	7.92	67.979
	30	14.000"	355.60	13.250"	336.55	0.375"	9.53	81.209
	40	14.000"	355.60	13.126"	333.40	0.437"	11.10	94.305
	60	14.000"	355.60	12.814"	325.48	0.593"	15.06	126.360

ANEXO 2: Tabla de propiedades del acero al carbón.

4. Propiedades termofísicas de la materia

Tabla 4.1: Propiedades termofísicas de sólidos metálicos a 300 K

Descripción	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Acero puro	7870	447	80.2	23.1
Acero al carbono	7854	434	60.5	17.7
Acero al carbono-silicio	7817	446	51.9	14.9
Acero al carbono-Manganeso-silicio	8131	434	41.0	11.6
Acero con cromo (bajo)	7822	444	37.7	10.9
Acero inoxidable, AISI 302	8055	480	15.1	3.9
Acero inoxidable, AISI 304	7900	477	14.9	3.9
Acero inoxidable, AISI 316	8238	468	13.4	3.5
Acero inoxidable, AISI 347	7978	480	14.2	3.7
Aluminio puro	2702	903	237.0	97.1
Aluminio, aleación 2024-T6	2770	875	177.0	73.0
Aluminio, aleación 195, vaciado	2790	883	168.0	68.2
Armco (99.75% puro)	7870	447	72.7	20.7

ANEXO 3: Tabla de propiedades termodinámicas del agua saturada.

Tabla 4.6: Propiedades termodinámicas del agua saturada

T (°C)	P_{sat} (kPa)	Δh_{fg} (kJ/kg)	ρ_l (kg/m ³)	v_g (m ³ /kg)	$c_{p,l}$ (kJ/kg·K)	$c_{p,g}$ (kJ/kg·K)	$\mu_l \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\mu_g \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$k_l \cdot 10^3$ (W/m·K)	$k_g \cdot 10^3$ (W/m·K)	Pr_l	Pr_g
0.01	0.611	2501	1000.0	206.1	4.229	1.868	1793	9.216	561	17.07	13.52	1.008
5	0.873	2489	1000.0	147.0	4.200	1.871	1519	9.336	570.5	17.34	11.18	1.007
10	1.228	2477	999.7	106.3	4.188	1.874	1307	9.461	580.0	17.62	9.435	1.006
15	1.706	2465	999.1	77.90	4.184	1.878	1138	9.592	589.3	17.92	8.081	1.005
20	2.339	2453	998.2	57.78	4.183	1.882	1002	9.727	598.4	18.23	7.006	1.004
25	3.169	2442	997.0	43.36	4.183	1.887	890.5	9.867	607.1	18.55	6.136	1.004
30	4.246	2430	995.6	32.90	4.183	1.892	797.7	10.01	615.4	18.88	5.422	1.003
35	5.627	2418	994.0	25.22	4.183	1.898	719.6	10.16	623.3	19.23	4.830	1.002
40	7.381	2406	992.2	19.53	4.182	1.904	653.3	10.31	630.6	19.60	4.333	1.002
45	9.590	2394	990.2	15.26	4.182	1.912	596.3	10.46	637.3	19.97	3.913	1.001
50	12.34	2382	988.0	12.04	4.182	1.919	547.1	10.62	643.5	20.36	3.555	1.001
55	15.75	2370	985.7	9.573	4.182	1.928	504.2	10.77	649.2	20.77	3.248	1.000
60	19.93	2358	983.2	7.674	4.183	1.937	466.6	10.93	654.3	21.18	2.983	0.9998
65	25.02	2345	980.5	6.200	4.184	1.947	433.4	11.10	659.0	21.62	2.752	0.9995
70	31.18	2333	977.7	5.045	4.187	1.958	404.0	11.26	663.1	22.07	2.551	0.9992
75	38.56	2321	974.8	4.133	4.190	1.970	377.9	11.43	666.8	22.53	2.375	0.9990
80	47.37	2308	971.8	3.409	4.194	1.983	354.5	11.59	670.0	23.01	2.219	0.9989
85	57.81	2295	968.6	2.829	4.199	1.996	333.5	11.76	672.8	23.50	2.081	0.9988
90	70.12	2283	965.3	2.362	4.204	2.011	314.5	11.93	675.3	24.02	1.958	0.9989
95	84.53	2270	961.9	1.982	4.210	2.027	297.1	12.10	677.4	24.55	1.840	0.9990
100	101.3	2257	958.4	1.674	4.217	2.044	281.9	12.27	679.1	25.09	1.750	0.9993
110	143.2	2220	951.8	1.211	4.232	2.082	237.0	12.61	681.7	26.21	1.502	1.001
120	198.5	2202	943.2	0.8922	4.249	2.125	232.1	12.96	683.2	27.46	1.444	1.003
130	270.0	2174	934.9	0.6687	4.267	2.175	213.0	13.30	683.7	28.76	1.329	1.006
140	361.2	2145	926.2	0.5090	4.288	2.233	196.6	13.65	683.3	30.13	1.234	1.011
150	475.7	2114	917.1	0.3929	4.312	2.298	182.5	13.99	682.1	31.58	1.154	1.018
160	617.7	2082	907.5	0.3071	4.338	2.373	170.3	14.34	680.0	33.11	1.086	1.028
170	791.5	2049	897.5	0.2428	4.368	2.459	159.6	14.68	677.1	34.72	1.030	1.040
180	1002	2015	887.1	0.1940	4.403	2.557	150.2	15.03	673.4	36.41	0.9820	1.055
190	1254	1978	876.1	0.1565	4.443	2.669	141.8	15.37	668.8	38.18	0.9421	1.074
200	1554	1940	864.7	0.1273	4.489	2.796	134.4	15.71	663.4	40.03	0.9092	1.097
220	2318	1858	840.3	0.08616	4.604	3.107	121.6	16.41	649.8	43.99	0.8613	1.159
240	3345	1766	813.5	0.05974	4.759	3.516	110.9	17.12	632.0	48.31	0.8351	1.246
260	4689	1662	783.8	0.04219	4.973	4.064	101.7	17.88	609.2	53.10	0.8304	1.368
280	6413	1543	750.5	0.03016	5.278	4.828	93.56	18.70	580.3	58.53	0.8511	1.542
300	8584	1405	712.4	0.02167	5.744	5.967	85.95	19.65	543.6	64.98	0.9083	1.804
320	11279	1238	667.4	0.01548	6.542	7.870	78.46	20.84	496.7	73.25	1.033	2.240
340	14594	1028	610.8	0.01079	8.237	11.79	70.45	22.55	435.6	85.24	1.332	3.118
360	18655	721	528.1	0.00696	14.680	25.28	60.39	25.71	351.0	107.5	2.525	6.046

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

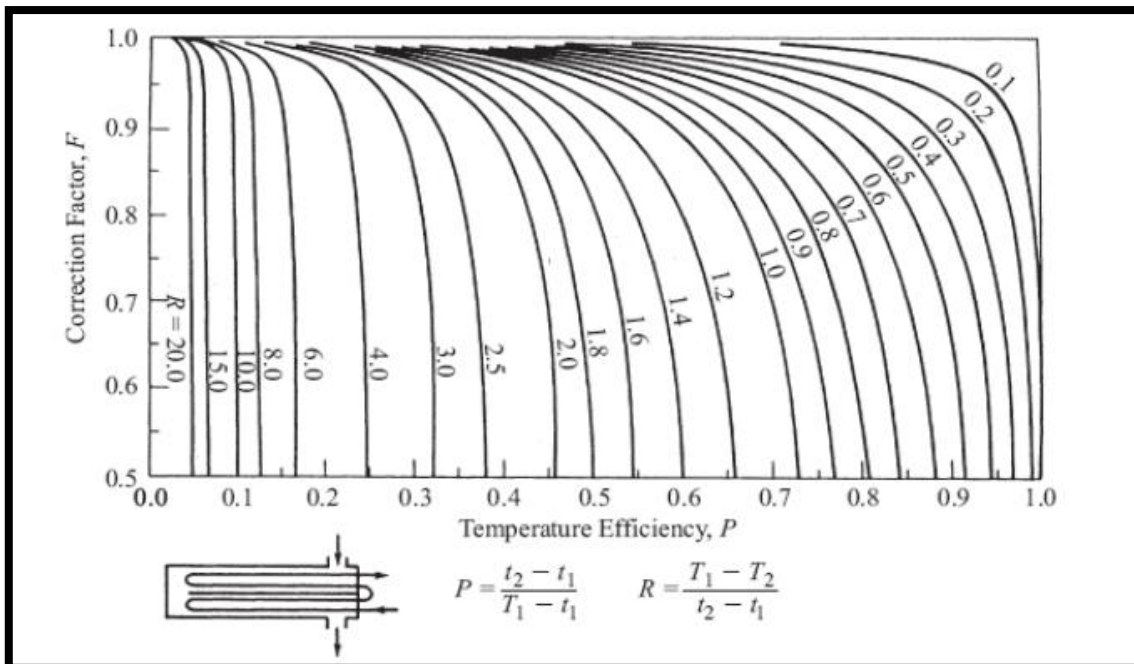
ANEXO 4: Velocidad recomendadas para fluidos en tuberías.

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5 – 1	0.15 – 0.30
	Entrada de bomba	1 – 3	0.3 – 0.9
	Salida de bomba	4 – 10	1.2 – 3
	Línea de Conducción	4 – 8	1.2 – 2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2 – 0.5	0.06 – 0.15
	Salida de bomba	0.5 – 2	0.15 – 0.6
Vapor de Agua		30 – 50	9 – 15
Aire o gas		30 – 100	9 – 30

ANEXO 5: Coeficiente de transferencia de calor por conversión.

Tipo de convección	$h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$
Convección libre de un líquido	0 - 500
Convección forzada de un líquido	0 - 5000
Convección de un cambio de fase	0 - 50000

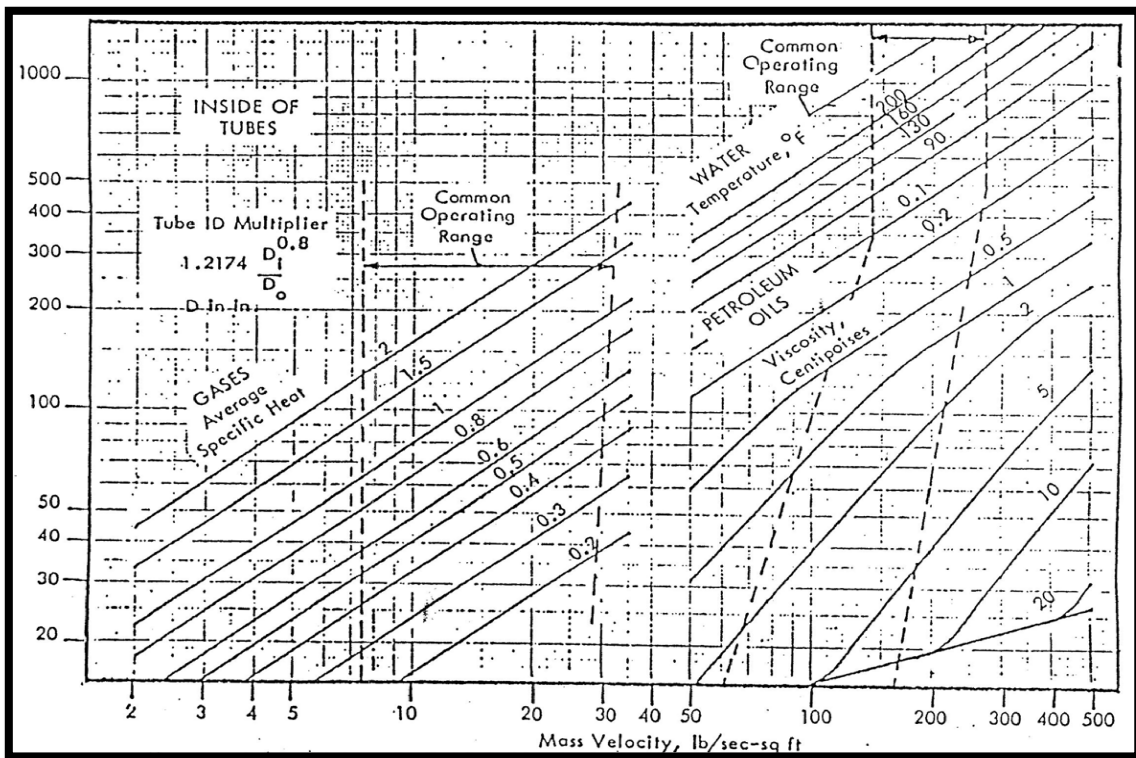
ANEXO 6: Factor de corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica para intercambiadores de tubo y carcaza con dos pasos por la carcaza y el paso por el tubo cuatro veces.



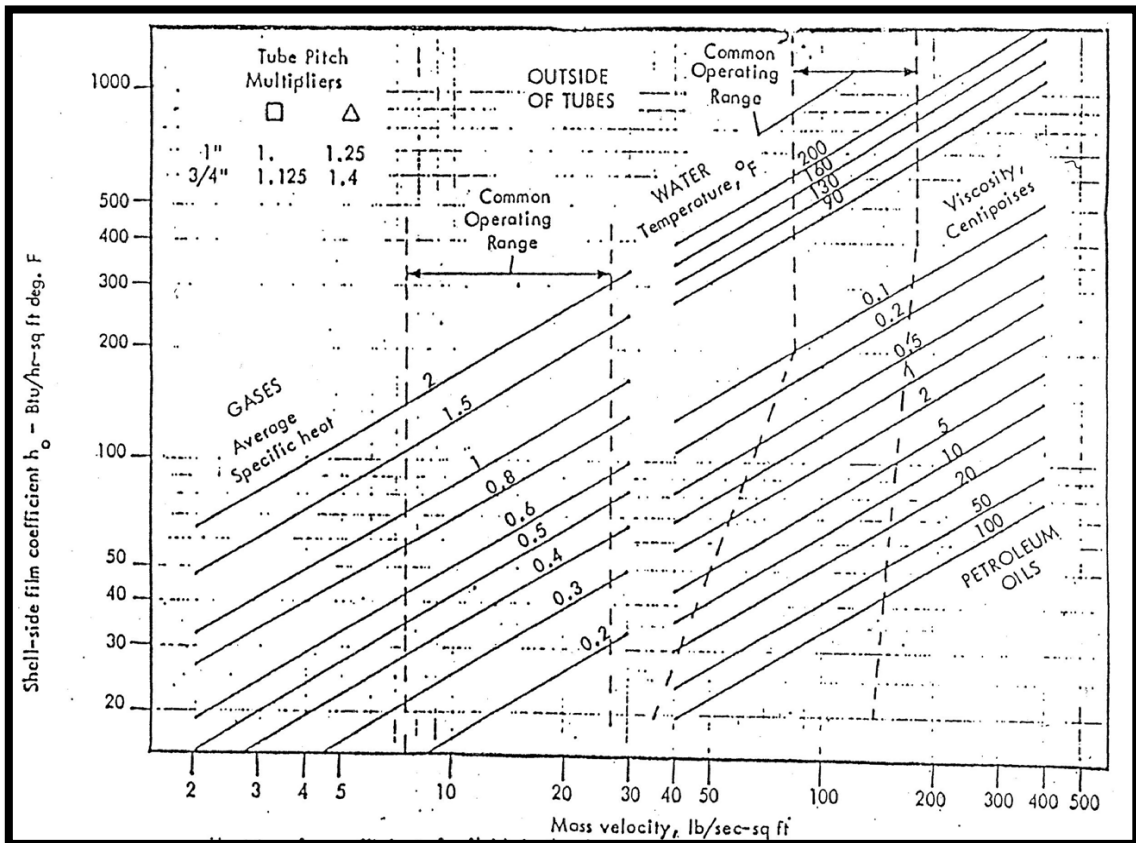
ANEXO 7: Datos de tubos dentro del intercambiador de calor.

d_e , in	BWG	e , in	d_i , in	A_F , in ² /tubo	$A_{S,O}$, ft ² /ft _{lineal}	$A_{S,i}$, ft ² /ft _{lineal}	W , lb _{acero} /ft _{lineal}	
1/2	12	0,109	0,282	0,0625	0,1309	0,0748	0,493	
	14	0,083	0,334	0,0876		0,0874	0,403	
	16	0,065	0,370	0,1076		0,0969	0,329	
	18	0,049	0,402	0,127		0,1052	0,258	
	20	0,035	0,430	0,145		0,1125	0,190	
3/4	10	0,134	0,482	0,182	0,1963	0,1263	0,965	
	11	0,120	0,510	0,204		0,1335	0,884	
	12	0,109	0,532	0,223		0,1393	0,817	
	13	0,095	0,560	0,247		0,1466	0,727	
	14	0,083	0,584	0,268		0,1529	0,647	
	15	0,072	0,606	0,289		0,1587	0,571	
	16	0,065	0,620	0,302		0,1623	0,520	
	17	0,058	0,634	0,314		0,1660	0,469	
	18	0,049	0,652	0,344		0,1707	0,401	
1	8	0,165	0,670	0,355	0,2618	0,1754	1,61	
	9	0,148	0,704	0,389		0,1843	1,47	
	10	0,134	0,732	0,421		0,1916	1,36	
	11	0,120	0,760	0,455		0,1990	1,23	
	12	0,109	0,782	0,479		0,2048	1,14	
	13	0,095	0,810	0,515		0,2121	1,00	
	14	0,083	0,834	0,546		0,2183	0,890	
	15	0,072	0,856	0,576		0,2241	0,781	
	16	0,065	0,870	0,594		0,2277	0,710	
	17	0,058	0,884	0,613		0,2314	0,639	
1 1/4	8	0,165	0,920	0,665	0,3271	0,2409	2,09	
	9	0,148	0,954	0,714		0,2198	1,91	
	10	0,134	0,982	0,757		0,2572	1,75	
	11	0,120	1,01	0,800		0,2644	1,58	
	12	0,109	1,03	0,836		0,2701	1,45	
	13	0,095	1,06	0,884		0,2775	1,28	
	14	0,083	1,08	0,923			0,2839	1,13
	15	0,072	1,11	0,960			0,2896	0,991
	16	0,065	1,12	0,985			0,2932	0,900
	17	0,058	1,13	1,01			0,2969	0,808
1 1/2	8	0,165	1,17	1,075	0,3925	0,3063	2,57	
	9	0,148	1,10	1,14		0,3152	2,34	
	10	0,134	1,23	1,19		0,3225	2,14	
	11	0,120	1,26	1,25		0,3299	1,98	
	12	0,109	1,28	1,29		0,3356	1,77	
	13	0,095	1,31	1,35		0,3430	1,56	
	14	0,083	1,33	1,40		0,3492	1,37	
	15	0,072	1,36	1,44		0,3555	1,20	
	16	0,065	1,37	1,47		0,3587	1,09	

ANEXO 8: Diagrama para hallar el coeficiente de película, lado del tubo (h_{i0}).



ANEXO 9: Diagrama para hallar coeficiente de película, lado del casco (h_0).



ANEXO 10: Resistencia de suciedad externa e interna (r).

r_d				r_i			
Lado de la cubierta (o coraza)	Lado de los tubos	U de diseño	Incluye la suciedad total	Lado de la cubierta (o coraza)	Lado de los tubos	U de diseño	Incluye la suciedad total
Medios de líquido-líquido				Medios de gas-líquido			
Aroclor 1248	Combust. para jet	100-150	0.0015	Aire, N ₂ , etc. (comprimidos)	Agua o salmuera	40-80	.005
Asfalto diluido	Agua	10-20	.01	Aire, N ₂ etc., A	Agua o salmuera	10-50	.005
Agua desmineralizada	Agua	300-500	.001	Agua o salmuera	Aire, N ₂ (comprimido)	20-40	.005
Soluciones de 10-25% de etanolamino (MEA o DEA)	Soluciones de agua, DEA o MEA	140-200	.003	Agua o salmuera	Aire, N ₂ , etc., A	5-20	.005
Combustóleo	Agua	15-25	.007	Agua	Mezclas de gas natural que contienen hidrógeno	80-125	.003
Combustóleo	Petróleo	10-15	.008	Vaporizadores			
Gasolina	Agua	60-100	.003	Amoniaco anhidro	Condensación de vapor	150-300	.0015
Aceites pesados	Aceites pesados	10-40	.004	Cloro	Condensación de vapor	150-300	.0015
Aceites pesados	Agua	15-50	.005	Cloro	Aceite ligero de transformación calientada	40-60	.0015
Corriente reformadora rica en hidrógeno	Corriente reformadora rica en hidrógeno	90-120	.002	Propano, butano, etc.	Condensación de vapor	200-300	.0015
Queroseno o gasoil	Agua	25-50	.005	Agua	Condensación de vapor	200-400	.0015
Queroseno o gasoil	Petróleo	20-35	.005	$r_d = hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F / BTU$ $U = BTU / hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$			
Queroseno o comb. para jet	Tricloroetileno	40-50	.0015				
Agua para la cubierta	Agua	230-300	.002				
Aceite lub. (baja viscosidad)	Agua	25-50	.002				
Aceite lub. (alta viscosidad)	Agua	40-80	.003				
Aceite lubricante	Petróleo	11-20	.006				
Nafta	Agua	50-70	.005				
Nafta	Petróleo	25-35	.005				
Disolventes orgánicos	Agua	50-150	.003				
Disolventes orgánicos	Salmuera	35-90	.003				
Disolventes orgánicos	Disolventes orgánicos	20-60	.002				
Derivados de aceite de resina, aceites vegetales, etc.	Agua	20-50	.004				

ANEXO 11: Tablas de sobre vapor y liquido saturado del Isobutano.

Table 21. (Continued)
Isobutane isobar at P = 0.05 MPa

Temp. K	Density		Z	Isochore Derivative MPa/K	Isotherm Derivative MPa·m ³ /kg	Internal Energy J/mol	Enthalpy J/mol	Entropy J/(mol·K)	C _v J/(mol·K)	C _p J/(mol·K)	Fugacity/ Pressure Ratio	Vel. of Sound m/s	Dielectric Constant
	mol/L	kg/m ³											
113.572	.1275E+02	.74137E+03	.00415	2.357903	2.42696	1.5	5.4	108.814	69.14	96.66	.39347E-06	1841	2.10786
120.000	.1265E+02	.73514E+03	.00396	2.239376	2.31212	625.3	629.2	114.172	69.99	97.99	.19196E-05	1799	2.09374
130.000	.1248E+02	.72547E+03	.00371	2.071456	2.14638	1613.9	1617.9	122.098	71.39	100.09	.16096E-04	1734	2.07238
140.000	.1232E+02	.71583E+03	.00349	1.920472	1.99386	2624.7	2628.8	129.594	72.89	102.26	.96766E-04	1672	2.05166
150.000	.1215E+02	.70620E+03	.00330	1.783652	1.85236	3658.0	3662.1	136.725	74.46	104.49	.44665E-03	1612	2.03147
160.000	.1198E+02	.69657E+03	.00314	1.658832	1.72021	4714.1	4718.3	143.541	76.11	106.77	.16660E-02	1553	2.01170
170.000	.1182E+02	.68691E+03	.00299	1.544287	1.59613	5793.5	5797.8	150.083	77.79	109.07	.52208E-02	1496	1.99229
180.000	.1165E+02	.67721E+03	.00287	1.438619	1.47911	6896.4	6900.7	156.383	79.48	111.40	.14165E-01	1439	1.97316
190.000	.1148E+02	.66745E+03	.00276	1.340684	1.36837	8022.6	8027.0	162.469	81.18	113.74	.34069E-01	1384	1.95424
200.000	.1131E+02	.65761E+03	.00266	1.249529	1.26327	9172.3	9176.7	168.363	82.86	116.08	.74012E-01	1330	1.93546
210.000	.1114E+02	.64766E+03	.00257	1.164353	1.16330	10345.3	10349.8	174.083	84.52	118.44	.14744E+00	1276	1.91677
220.000	.1097E+02	.63758E+03	.00249	1.084473	1.06805	11541.6	11546.2	179.648	86.18	120.81	.27267E+00	1223	1.89811
230.000	.1079E+02	.62734E+03	.00242	1.009302	.97717	12761.5	12766.1	185.071	87.82	123.23	.47289E+00	1170	1.87940
240.000	.1061E+02	.61691E+03	.00236	.938333	.89040	14005.3	14010.0	190.368	89.47	125.71	.77563E+00	1118	1.86060
244.860	.1053E+02	.61176E+03	.00233	.905221	.84963	14619.4	14624.1	192.901	90.27	126.95	.96927E+00	1093	1.85140
244.860	.2530E-01	.14703E+01	.97089	.000216	.03307	34771.2	36747.8	283.253	74.88	84.13	.96927E+00	192	1.00158
250.000	.2473E-01	.14376E+01	.97254	.000210	.03389	35161.5	37183.0	285.012	76.08	85.25	.97082E+00	194	1.00155
260.000	.2371E-01	.13784E+01	.97532	.000201	.03545	35938.5	38047.0	288.400	78.53	87.56	.97353E+00	198	1.00148
270.000	.2278E-01	.13241E+01	.97767	.000192	.03699	36739.9	38934.7	291.750	81.06	90.01	.97587E+00	202	1.00142
280.000	.2192E-01	.12742E+01	.97968	.000185	.03852	37566.6	39847.4	295.069	83.67	92.54	.97790E+00	206	1.00137
290.000	.2113E-01	.12281E+01	.98142	.000178	.04004	38419.3	40785.7	298.361	86.32	95.13	.97968E+00	210	1.00132
300.000	.2039E-01	.11853E+01	.98294	.000171	.04154	39298.3	41750.1	301.631	89.00	97.77	.98125E+00	213	1.00127
310.000	.1971E-01	.11456E+01	.98427	.000165	.04304	40204.2	42741.1	304.880	91.72	100.44	.98265E+00	217	1.00122
320.000	.1907E-01	.11084E+01	.98545	.000160	.04453	41137.1	43759.0	308.111	94.45	103.13	.98390E+00	220	1.00118
330.000	.1847E-01	.10737E+01	.98651	.000155	.04602	42097.1	44803.9	311.326	97.19	105.84	.98502E+00	223	1.00115
340.000	.1791E-01	.10411E+01	.98745	.000150	.04750	43084.4	45875.9	314.526	99.93	108.56	.98603E+00	227	1.00111
350.000	.1739E-01	.10105E+01	.98830	.000145	.04898	44099.0	46975.0	317.712	102.67	111.27	.98694E+00	230	1.00108
360.000	.1689E-01	.98166E+00	.98907	.000141	.05045	45140.8	48101.3	320.885	105.39	113.98	.98777E+00	233	1.00105
370.000	.1642E-01	.95446E+00	.98977	.000137	.05193	46209.7	49254.6	324.044	108.11	116.67	.98853E+00	236	1.00102
380.000	.1598E-01	.92875E+00	.99040	.000134	.05339	47305.5	50434.7	327.191	110.80	119.35	.98922E+00	239	1.00099
390.000	.1556E-01	.90440E+00	.99098	.000130	.05486	48428.2	51641.6	330.326	113.48	122.01	.98985E+00	242	1.00096
400.000	.1516E-01	.88132E+00	.99151	.000127	.05632	49577.3	52874.9	333.449	116.13	124.65	.99043E+00	245	1.00094
410.000	.1479E-01	.85940E+00	.99200	.000123	.05778	50752.8	54134.5	336.559	118.75	127.26	.99097E+00	248	1.00091
420.000	.1443E-01	.83856E+00	.99245	.000120	.05924	51954.3	55420.0	339.656	121.34	129.84	.99146E+00	251	1.00089
430.000	.1409E-01	.81872E+00	.99286	.000118	.06070	53181.5	56731.2	342.741	123.90	132.39	.99192E+00	254	1.00087
440.000	.1376E-01	.79981E+00	.99324	.000115	.06216	54434.1	58067.7	345.814	126.43	134.91	.99234E+00	257	1.00085
450.000	.1345E-01	.78175E+00	.99359	.000112	.06361	55711.8	59429.3	348.874	128.93	137.40	.99273E+00	260	1.00083

Isobutane Isobar at P = 0.101325 MPa													
Temp. K	Density		Z	Isochore Derivative MPa/K	Isotherm Derivative MPa·m ³ /kg	Internal Energy J/mol	Enthalpy J/mol	Entropy J/(mol·K)	C _v J/(mol·K)	C _p J/(mol·K)	Fugacity/ Pressure Ratio	Vel. of Sound m/s	Dielectric Constant
	mol/L	kg/m ³											
113.594	.1275E+02	.74137E+03	.00841	2.357622	2.42710	3.1	11.0	108.827	69.15	96.66	.19613E-06	1841	2.10785
120.000	.1265E+02	.73516E+03	.00803	2.239532	2.31267	624.7	632.7	114.166	70.00	97.99	.95110E-06	1799	2.09378
130.000	.1248E+02	.72550E+03	.00751	2.071627	2.14695	1613.2	1621.3	122.092	71.40	100.09	.79731E-05	1734	2.07242
140.000	.1232E+02	.71586E+03	.00707	1.920656	1.99444	2623.9	2632.1	129.589	72.89	102.26	.47922E-04	1672	2.05171
150.000	.1215E+02	.70623E+03	.00669	1.783849	1.85295	3657.1	3665.5	136.719	74.47	104.49	.22115E-03	1612	2.03151
160.000	.1198E+02	.69660E+03	.00636	1.659040	1.72082	4713.2	4721.6	143.535	76.11	106.76	.82475E-03	1553	2.01175
170.000	.1182E+02	.68694E+03	.00607	1.544505	1.59675	5792.5	5801.1	150.077	77.79	109.07	.25842E-02	1496	1.99235
180.000	.1165E+02	.67725E+03	.00581	1.438848	1.47975	6895.2	6903.9	156.377	79.48	111.40	.70105E-02	1440	1.97322
190.000	.1148E+02	.66749E+03	.00559	1.340924	1.36903	8021.4	8030.2	162.463	81.18	113.73	.16859E-01	1384	1.95430
200.000	.1131E+02	.65765E+03	.00539	1.249780	1.26394	9170.9	9179.9	168.356	82.86	116.08	.36622E-01	1330	1.93553
210.000	.1114E+02	.64771E+03	.00521	1.164614	1.16399	10343.8	10352.9	174.076	84.53	118.43	.72948E-01	1277	1.91684
220.000	.1097E+02	.63763E+03	.00505	1.084746	1.06876	11540.0	11549.2	179.640	86.18	120.81	.13489E+00	1224	1.89819
230.000	.1079E+02	.62740E+03	.00491	1.009589	.97790	12759.7	12769.1	185.063	87.82	123.22	.23393E+00	1171	1.87949
240.000	.1061E+02	.61697E+03	.00478	.938634	.89115	14003.3	14012.9	190.360	89.47	125.70	.38367E+00	1118	1.86069
250.000	.1043E+02	.60632E+03	.00467	.871433	.80827	15271.7	15281.4	195.543	91.13	128.27	.59934E+00	1066	1.84173
260.000	.1024E+02	.59539E+03	.00458	.807589	.72906	16565.7	16575.6	200.625	92.81	130.94	.89708E+00	1014	1.82251
261.517	.1021E+02	.59371E+03	.00456	.798174	.71735	16764.7	16774.7	201.388	93.06	131.36	.95065E+00	1006	1.81957
270.000	.4889E-01	.28414E+01	.95324	.000425	.03408	35958.4	38031.1	282.669	79.61	89.58	.95065E+00	195	1.00306
270.000	.4714E-01	.27401E+01	.95743	.000407	.03552	36648.8	38798.1	285.555	81.58	91.31	.95452E+00	199	1.00294
280.000	.4526E-01	.26308E+01	.96160	.000388	.03717	37483.7	39722.4	288.917	84.04	93.57	.95850E+00	203	1.00282
290.000	.4354E-01	.25308E+01	.96513	.000372	.03878	38343.0	40670.1	292.242	86.61	95.98	.96196E+00	207	1.00271
300.000	.4196E-01	.24387E+01	.96817	.000357	.04038	39227.5	41642.4	295.538	89.24	98.49	.96499E+00	211	1.00261
310.000	.4049E-01	.23536E+01	.97081	.000344	.04195	40137.9	42640.1	298.809	91.91	101.06	.96767E+00	214	1.00252
320.000	.3913E-01	.22747E+01	.97313	.000331	.04351	41074.6	43663.8	302.059	94.60	103.68	.97005E+00	218	1.00243
330.000	.3787E-01	.22011E+01	.97518	.000320	.04505	42038.1	44713.8	305.290	97.32	106.32	.97218E+00	221	1.00235
340.000	.3669E-01	.21324E+01	.97700	.000310	.04658	43028.4	45790.3	308.503	100.04	108.98	.97409E+00	225	1.00228
350.000	.3558E-01	.20680E+01	.97862	.000300	.04811	44045.6	46893.5	311.701	102.76	111.65	.97582E+00	228	1.00220
360.000	.3454E-01	.20076E+01	.98008	.000291	.04962	45089.8	48023.4	314.884	105.48	114.33	.97738E+00	231	1.00214
370.000	.3356E-01	.19507E+01	.98140	.000282	.05113	46160.9	49180.0	318.052	108.18	116.99	.97880E+00	235	1.00208
380.000	.3264E-01	.18971E+01	.98260	.000274	.05264	47258.7	50363.2	321.208	110.87	119.64	.98010E+00	238	1.00202
390.000	.3177E-01	.18464E+01	.98368	.000267	.05414	48383.1	51572.8	324.349	113.53	122.28	.98128E+00	241	1.00196
400.000	.3094E-01	.17984E+01	.98467	.000260	.05563	49533.9	52808.7	327.478	116.18	124.89	.98237E+00	244	1.00191
410.000	.3016E-01	.17529E+01	.98558	.000253	.05712	50710.8	54070.6	330.594	118.79	127.49	.98337E+00	247	1.00186
420.000	.2942E-01	.17097E+01	.98641	.000247	.05860	51913.7	55358.3	333.697	121.38	130.05	.98429E+00	250	1.00181
430.000	.2871E-01	.16687E+01	.98718	.000241	.06009	53142.2	56671.6	336.787	123.94	132.59	.98514E+00	253	1.00177
440.000	.2804E-01	.16296E+01	.98788	.000235	.06157	54396.0	58010.0	339.864	126.46	135.10	.98593E+00	256	1.00173
450.000	.2740E-01	.15923E+01	.98854	.000229	.06304	55674.8	59373.4	342.928	128.96	137.57	.98666E+00	259	1.00169
460.000	.2678E-01	.15568E+01	.98914	.000224	.06452	56978.2	60761.4	345.978	131.41	140.01	.98734E+00	262	0.00000
470.000	.2620E-01	.15228E+01	.98970	.000219	.06599	58306.0	62173.6	349.015	133.84	142.42	.98797E+00	264	0.00000
480.000	.2564E-01	.14903E+01	.99022	.000215	.06746	59657.8	63609.7	352.039	136.22	144.80	.98856E+00	267	0.00000
490.000	.2510E-01	.14591E+01	.99071	.000210	.06893	61033.2	65069.4	355.048	138.58	147.14	.98911E+00	270	0.00000
500.000	.2459E-01	.14293E+01	.99116	.000206	.07039	62431.8	66552.3	358.044	140.89	149.44	.98963E+00	273	0.00000
520.000	.2363E-01	.13732E+01	.99198	.000198	.07332	65297.5	69586.4	363.994	145.41	153.94	.99056E+00	278	0.00000
540.000	.2273E-01	.13214E+01	.99271	.000190	.07624	68252.0	72709.1	369.886	149.79	158.30	.99138E+00	283	0.00000

Table 21. (Continued)

Isobutane Isobar at P = 3.0 MPa

Temp., K	Density		Z	Isochore Derivative	Isotherm Derivative	Internal Energy	Enthalpy	Entropy	C _v	C _p	Fugacity/ Pressure Ratio	Vel. of Sound	Dielect Consta
	mol/L	kg/m ³		MPa/K	MPa·m ³ /kg	J/mol	J/mol	J/(mol·K)	J/(mol·K)	J/(mol·K)		m/s	
114.817	.1276E+02	.74138E+03	.24637	2.342678	2.43582	87.1	322.3	109.567	69.49	96.84	.11532E-07	1842	2.1071
120.000	.1267E+02	.73641E+03	.23733	2.248327	2.34413	588.9	825.7	113.866	70.17	97.91	.40410E-07	1808	2.0958
130.000	.1250E+02	.72684E+03	.22195	2.081273	2.17910	1573.6	1813.5	121.785	71.57	100.00	.33377E-06	1744	2.0746
140.000	.1234E+02	.71730E+03	.20884	1.931045	2.02731	2580.2	2823.3	129.274	73.06	102.15	.19808E-05	1683	2.0541
150.000	.1218E+02	.70778E+03	.19754	1.794905	1.88657	3609.0	3855.4	136.397	74.63	104.36	.90421E-05	1624	2.0341
160.000	.1201E+02	.69827E+03	.18772	1.670714	1.75521	4660.4	4910.1	143.203	76.27	106.61	.33403E-04	1566	2.0145
170.000	.1185E+02	.68874E+03	.17912	1.556768	1.63195	5734.7	5987.9	149.735	77.95	108.89	.10380E-03	1509	1.9953
180.000	.1168E+02	.67918E+03	.17155	1.451684	1.51578	6832.0	7088.7	156.024	79.65	111.18	.27953E-03	1454	1.9764
190.000	.1152E+02	.66958E+03	.16485	1.354333	1.40593	7952.2	8212.7	162.096	81.34	113.48	.66791E-03	1400	1.9577
200.000	.1135E+02	.65991E+03	.15890	1.263773	1.30175	9095.3	9359.6	167.976	83.03	115.78	.14425E-02	1347	1.9392
210.000	.1119E+02	.65015E+03	.15361	1.179214	1.20274	10261.1	10529.3	173.680	84.69	118.08	.28588E-02	1294	1.9208
220.000	.1102E+02	.64029E+03	.14888	1.099985	1.10848	11449.5	11721.8	179.226	86.34	120.39	.52625E-02	1243	1.9025
230.000	.1084E+02	.63030E+03	.14467	1.025512	1.01866	12660.4	12937.1	184.629	87.99	122.73	.90893E-02	1192	1.8842
240.000	.1067E+02	.62015E+03	.14091	.955299	.93298	13894.3	14175.5	189.903	89.63	125.11	.14854E-01	1141	1.8658
250.000	.1049E+02	.60981E+03	.13756	.888914	.85123	15151.6	15437.6	195.059	91.29	127.56	.23129E-01	1090	1.8474
260.000	.1031E+02	.59925E+03	.13460	.825976	.77322	16433.2	16724.1	200.112	92.97	130.10	.34522E-01	1040	1.8287
270.000	.1012E+02	.58843E+03	.13200	.766147	.69880	17739.9	18036.2	205.071	94.67	132.74	.49640E-01	989	1.8099
280.000	.9932E+01	.57731E+03	.12974	.709125	.62784	19073.1	19375.2	209.948	96.39	135.50	.69066E-01	939	1.7907
290.000	.9735E+01	.56582E+03	.12781	.654635	.56024	20434.3	20742.5	214.753	98.12	138.40	.93325E-01	888	1.7711
300.000	.9530E+01	.55391E+03	.12621	.602422	.49590	21824.9	22139.7	219.496	99.85	141.44	.12287E+00	838	1.7510
310.000	.9316E+01	.54150E+03	.12494	.552245	.43473	23246.8	23568.8	224.185	101.56	144.67	.15803E+00	786	1.7303
320.000	.9092E+01	.52847E+03	.12402	.503870	.37666	24701.9	25031.9	228.832	103.23	148.12	.19906E+00	735	1.7088
330.000	.8855E+01	.51469E+03	.12348	.457054	.32159	26192.9	26531.7	233.447	104.85	151.88	.24605E+00	682	1.6863
340.000	.8602E+01	.49997E+03	.12337	.411536	.26945	27723.3	28072.1	238.042	106.44	156.13	.29894E+00	628	1.6626
350.000	.8328E+01	.48403E+03	.12379	.367002	.22014	29299.0	29659.3	242.639	108.08	161.20	.35751E+00	573	1.6373
360.000	.8025E+01	.46645E+03	.12489	.323033	.17355	30930.1	31303.9	247.267	109.92	167.74	.42132E+00	514	1.6097
370.000	.7681E+01	.44648E+03	.12695	.278987	.12950	32635.5	33026.0	251.982	112.30	177.15	.48964E+00	451	1.5788
380.000	.7272E+01	.42266E+03	.13058	.233658	.08772	34455.3	34867.8	256.895	115.95	192.90	.56133E+00	382	1.5426
390.000	.6728E+01	.39108E+03	.13750	.183904	.04752	36494.8	36940.6	262.283	122.49	227.99	.63477E+00	297	1.4955
396.410	.6183E+01	.35937E+03	.14722	.143652	.02121	38101.0	38586.2	266.461	130.47	304.07	.68241E+00	222	1.4494
396.410	.1825E+01	.10609E+03	.49867	.027917	.00667	44735.7	46379.3	286.121	138.96	378.27	.68241E+00	134	1.1186
400.000	.1646E+01	.95684E+02	.54795	.023408	.01096	45647.3	47469.7	288.856	132.80	259.73	.69353E+00	146	1.1064
410.000	.1405E+01	.81663E+02	.62638	.018218	.01859	47508.9	49644.2	294.229	129.32	193.11	.71926E+00	166	1.0901
420.000	.1269E+01	.73776E+02	.67683	.015588	.02418	49103.8	51467.3	298.623	129.28	174.34	.74107E+00	180	1.0811
430.000	.1174E+01	.68231E+02	.71481	.013859	.02885	50608.4	53164.0	302.616	130.24	165.98	.76015E+00	191	1.0747
440.000	.1100E+01	.63954E+02	.74528	.012595	.03295	52073.9	54800.4	306.378	131.66	161.77	.77716E+00	201	1.0699
450.000	.1040E+01	.60478E+02	.77061	.011613	.03665	53523.1	56406.3	309.987	133.35	159.66	.79246E+00	209	1.0659
460.000	.9902E+00	.57555E+02	.79214	.010820	.04006	54968.1	57997.7	313.484	135.19	158.77	.80632E+00	216	0.0000
470.000	.9469E+00	.55038E+02	.81074	.010161	.04324	56416.1	59584.3	316.897	137.12	158.65	.81892E+00	223	0.0000

TABLES AT SATURATION

T K	PRESSURE BAR	DENSITIES - MOL/DH3		VOL DH3/MOL		H - J/MOL		HEAT OF VAP J/MOL
		LIQ	VAP	LIQ	VAP	LIQ	VAP	
250.00	.634	10.42305	.03136	.095941	31.88291	-1459.	20344.	21803.
251.00	.662	10.40475	.03264	.096110	30.63337	-1332.	20422.	21754.
252.00	.691	10.38639	.03396	.096280	29.44226	-1205.	20500.	21705.
253.00	.721	10.36798	.03533	.096451	28.30780	-1078.	20577.	21655.
254.00	.752	10.34951	.03673	.096623	27.22639	-950.	20655.	21606.
255.00	.784	10.33100	.03818	.096796	26.19514	-823.	20733.	21556.
256.00	.817	10.31242	.03966	.096970	25.21132	-695.	20811.	21506.
257.00	.851	10.29380	.04120	.097146	24.27239	-566.	20889.	21456.
258.00	.886	10.27511	.04278	.097323	23.37595	-438.	20968.	21406.
259.00	.922	10.25637	.04441	.097500	22.51976	-309.	21046.	21355.
260.00	.959	10.23758	.04608	.097679	21.70169	-180.	21124.	21304.
261.00	.998	10.21872	.04780	.097860	20.91975	-51.	21202.	21253.
262.00	1.037	10.19981	.04957	.098041	20.17209	79.	21281.	21202.
263.00	1.078	10.18083	.05140	.098224	19.45692	208.	21359.	21151.
264.00	1.121	10.16179	.05327	.098408	18.77260	338.	21437.	21099.
265.00	1.164	10.14270	.05520	.098593	18.11756	469.	21516.	21047.
266.00	1.209	10.12353	.05717	.098780	17.49033	599.	21594.	20995.
267.00	1.255	10.10431	.05921	.098968	16.88953	730.	21673.	20943.
268.00	1.302	10.08502	.06130	.099157	16.31384	861.	21751.	20890.
269.00	1.351	10.06567	.06344	.099348	15.76203	993.	21830.	20837.
270.00	1.401	10.04625	.06565	.099540	15.23293	1124.	21909.	20784.
271.00	1.453	10.02676	.06791	.099733	14.72544	1256.	21987.	20731.
272.00	1.506	10.00720	.07023	.099928	14.23853	1389.	22066.	20677.
273.00	1.560	9.98758	.07262	.100124	13.77120	1521.	22145.	20623.
274.00	1.616	9.96789	.07506	.100322	13.32253	1654.	22223.	20569.
275.00	1.674	9.94812	.07757	.100521	12.89164	1787.	22302.	20515.
276.00	1.733	9.92828	.08014	.100722	12.47770	1921.	22380.	20460.
277.00	1.794	9.90838	.08278	.100925	12.07992	2055.	22459.	20405.
278.00	1.856	9.88839	.08549	.101129	11.69756	2189.	22538.	20349.
279.00	1.920	9.86833	.08826	.101334	11.32990	2323.	22616.	20293.
280.00	1.985	9.84820	.09111	.101541	10.97628	2458.	22695.	20237.
281.00	2.053	9.82799	.09402	.101750	10.63607	2593.	22774.	20181.
282.00	2.122	9.80770	.09701	.101961	10.30866	2728.	22852.	20124.
283.00	2.193	9.78734	.10007	.102173	9.99348	2864.	22931.	20067.
284.00	2.265	9.76689	.10320	.102387	9.69000	3000.	23009.	20010.
285.00	2.340	9.74636	.10641	.102602	9.39769	3136.	23088.	19952.
286.00	2.416	9.72575	.10970	.102820	9.11607	3273.	23166.	19893.
287.00	2.494	9.70506	.11306	.103039	8.84468	3410.	23245.	19835.
288.00	2.574	9.68428	.11651	.103260	8.58307	3547.	23323.	19776.
289.00	2.656	9.66341	.12004	.103483	8.33082	3685.	23402.	19717.
290.00	2.740	9.64246	.12365	.103708	8.08755	3823.	23480.	19657.
291.00	2.826	9.62142	.12734	.103935	7.85286	3962.	23558.	19597.
292.00	2.914	9.60030	.13112	.104163	7.62640	4100.	23636.	19536.
293.00	3.004	9.57908	.13499	.104394	7.40783	4240.	23715.	19475.
294.00	3.096	9.55777	.13895	.104627	7.19681	4379.	23793.	19414.
295.00	3.190	9.53636	.14300	.104862	6.99304	4519.	23871.	19352.
296.00	3.286	9.51486	.14714	.105099	6.79622	4659.	23949.	19290.
297.00	3.385	9.49327	.15138	.105338	6.60607	4800.	24027.	19227.
298.00	3.485	9.47158	.15571	.105579	6.42232	4941.	24104.	19164.
299.00	3.588	9.44978	.16014	.105823	6.24471	5082.	24182.	19100.
300.00	3.693	9.42739	.16466	.106068	6.07300	5224.	24260.	19036.
301.00	3.801	9.40590	.16929	.106316	5.90695	5366.	24337.	18971.

ANEXO12: Tabla de dimensiones de la tubería de acero al carbón.

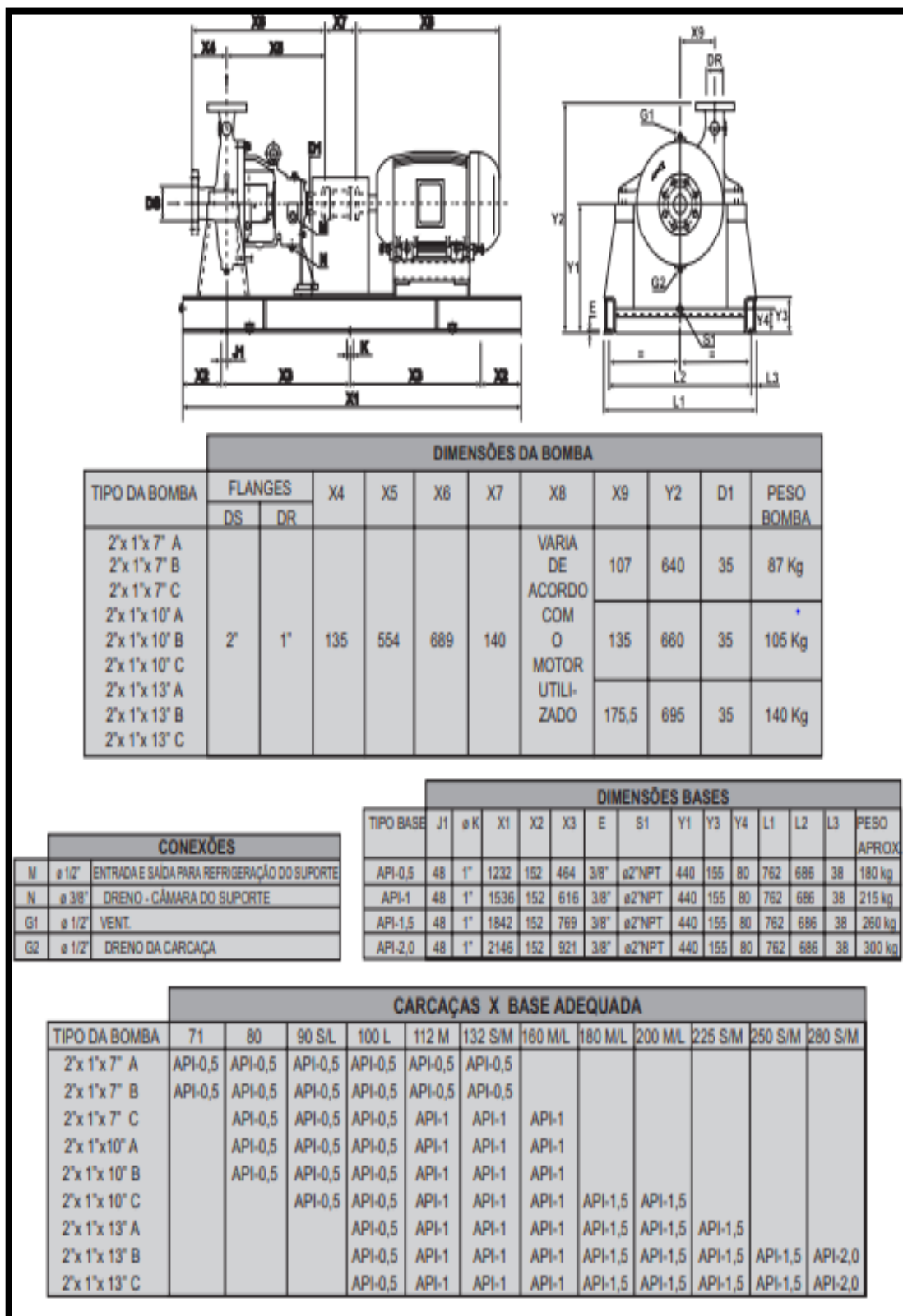
Dimensiones y Pesos Tubería acero con y sin costura convencionales de acuerdo a fórmula peso específico 7850 Kg/m ³							
Nominal Diameter	Diametro exterior Outside Diameter		Espesor de pared Wall thickness		Cédula Schedule / Designation	Peso Weight	
	in	in	mm	mm		Lb/ft	kg/m
24	24,000	609,6	1,250	31,75		304,02	452,43
			1,312	33,32		318,23	473,58
			1,375	34,93		332,58	494,94
			1,438	36,53		346,85	516,18
			1,500	38,10		360,81	536,95
			1,531	38,89	100	367,76	547,29
			1,562	39,67		374,69	557,60
			1,812	46,02	120	429,82	639,64
			2,062	52,37	140	483,61	719,69
			2,343	59,51	160	542,48	807,29
26	26,000	660,4	0,250	6,35		68,82	102,42
			0,281	7,14		77,26	114,98
			0,312	7,92	10	85,68	127,51
			0,344	8,74		94,35	140,41
			0,375	9,53	STD	102,73	152,88
			0,406	10,31		111,09	165,32
			0,438	11,13		119,70	178,13
			0,469	11,91		128,01	190,50
			0,500	12,70	20 XS	136,31	202,85
			0,562	14,27		152,84	227,45
			0,625	15,88		169,55	252,32
			0,688	17,48		186,18	277,06
			0,750	19,05		202,46	301,29
			0,812	20,62		218,66	325,39
			0,875	22,23		235,03	349,76
			0,938	23,83		251,32	374,01
			1,000	25,40		267,27	397,74
28	28,000	711,2	0,250	6,35		74,17	110,37
			0,281	7,14		83,27	123,92
			0,312	7,92	10	92,35	137,44
			0,344	8,74		101,71	151,36
			0,375	9,53	STD	110,75	164,81
			0,406	10,31		119,77	178,24
			0,438	11,13		129,06	192,06
			0,469	11,91		138,04	205,43
			0,500	12,70	20 XS	147,00	218,76
			0,562	14,27		164,85	245,33
			0,625	15,88	30	182,91	272,20
			0,688	17,48		200,89	298,95
			0,750	19,05		218,49	325,15
			0,812	20,62		236,02	351,23
			0,875	22,23		253,74	377,61
0,938	23,83		271,38	403,85			
1,000	25,40		288,65	429,56			

ANEXO13: Espesor de aislamiento térmico (Fibra de vidrio) a diferentes temperaturas internas.

Espesores Recomendados
Aislamiento para Tubería Fiberglas®
Tuberías Calientes Ta= 25 °C (77 °F)¹

TEMP. OPERACION	HASTA 65°C (150°F)								HASTA 121°C (250°F)								HASTA 177°C (350°F)								HASTA 232°C (450°F)							
	DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.							
	pulg.	mm	pulg.	mm	mm	W/m	°C	°F	pulg.	mm	mm	W/m	°C	°F	pulg.	mm	mm	W/m	°C	°F	pulg.	mm	mm	W/m	°C	°F						
1/2	12.7	1	25.4	7.44	7.15	28.7	83.6	1	25.4	20.0	19.23	33.8	92.9	1	25.4	36.2	34.80	40	104.0	1 1/2	38.0	45.9	44.13	38.9	102.0							
3/4	19.1	1	25.4	8.95	8.60	29.4	84.9	1	25.4	24.2	23.27	35.4	95.8	1	25.4	43.7	42.01	42.2	108.0	1 1/2	38.0	53.3	51.24	41.1	106.0							
1	25.4	1	25.4	9.28	8.92	28.8	83.9	1	25.4	25.0	24.03	34.2	93.5	1 1/2	38.0	45.2	43.45	40.6	105.0	2	50.8	49.7	47.78	36.4	97.5							
1 1/2	38.0	1	25.4	12.1	11.63	29.3	84.8	1	25.4	32.5	31.24	35.3	95.6	1 1/2	38.0	46.5	44.70	36.8	98.2	2	50.8	57.6	55.37	36.2	97.2							
2	51.0	1	25.4	14.1	13.56	29.5	85.1	1	25.4	38.2	36.72	35.8	96.5	1 1/2	38.0	53.0	50.95	37.1	98.7	2	50.8	70.2	67.49	38.3	101.0							
3	76.0	1	25.4	19.1	18.36	29.9	85.9	1	25.4	51.6	49.61	36.8	98.2	1 1/2	38.0	70.3	67.58	38.3	101.0	2	50.8	91.6	88.06	40.0	104.0							
4	102.0	1	25.4	22.9	22.02	30.3	86.5	1	25.4	62.1	59.70	37.0	98.6	2	50.8	69.7	67.01	35.7	96.2	2	50.8	109.3	105.08	40.5	105.0							
6	152.0	1	25.4	33.9	32.59	30.6	87.1	1 1/2	38.0	66.6	64.03	34.3	93.8	2	50.8	94.4	90.75	36.6	97.8	2	50.8	148.0	142.28	42.2	108.0							
8	203.0	1	25.4	42.3	40.67	30.7	87.3	1 1/2	38.0	80.4	77.29	34.3	93.8	2	50.8	116.0	111.52	37	98.6	2 1/2	63.5	149.0	143.24	38.9	102.0							
10	254.0	1	25.4	54.6	52.49	31.2	88.2	1 1/2	38.0	94.2	90.56	34.2	93.6	2	50.8	137.0	131.71	37.1	98.7	2 1/2	63.5	181.0	174.01	39.4	103.0							
12	304.0	1 1/2	38.0	40.6	39.03	28.9	84.0	1 1/2	38.0	109.0	104.79	34.4	93.9	2	50.8	158.0	151.90	37.3	99.1	2 1/2	63.5	208.0	199.96	40.0	104.0							
14	356.0	1 1/2	38.0	46.8	44.99	29.2	84.6	2	50.8	99.0	95.18	32.8	91.0	2 1/2	63.5	149.0	143.24	35.6	96.1	2 1/2	63.5	233.0	224.00	40.6	105.0							
16	406.0	1 1/2	38.0	52.8	50.76	29.3	84.7	2	50.8	110.0	105.75	32.9	91.2	2 1/2	63.5	167.0	160.55	35.8	96.4	3	76.0	225.0	216.31	38.3	101.0							
18	457.0	1 1/2	38.0	58.8	56.53	29.1	84.4	2	50.8	124.0	119.21	33.0	91.4	2 1/2	63.5	185.0	177.85	35.9	96.7	3	76.0	249.0	239.38	38.9	102.0							
20	508.0	1 1/2	38.0	64.9	62.39	29.3	84.8	2	50.8	136.0	130.75	33.1	91.5	2 1/2	63.5	203.0	195.16	36.1	96.9	3	76.0	273.0	262.45	38.9	102.0							
24	610.0	1 1/2	38.0	76.9	73.93	29.4	84.9	2	50.8	161.0	154.78	33.2	91.7	2 1/2	63.5	239.0	229.77	36.2	97.2	3	76.0	320.0	307.64	38.9	102.0							
26	660.0	1 1/2	38.0	81.0	77.87	29.3	84.8	2	50.8	170.4	163.82	33.1	91.5	2 1/2	63.5	254.7	244.86	36.2	97.1	3	76.0	340.0	326.87	38.9	102.0							
28	711.0	1 1/2	38.0	86.9	83.54	29.3	84.8	2	50.8	182.5	175.45	33.1	91.6	2 1/2	63.5	271.5	261.01	36.2	97.2	3	76.0	364.0	349.94	38.9	102.0							
30	762.0	2	50.8	73.6	70.76	28.4	83.2	2 1/2	63.5	163.0	156.70	31.8	89.2	3	76.0	250.0	240.34	34.7	94.4	3 1/2	89.0	342.0	328.79	37.4	99.4							

ANEXO14: Ficha técnica de la bomba OMEL modelo HDRP.



ANEXO 16: Ficha técnica del intercambiador de calor.

DETAILS

- Straight tube, internal clamp split ring, floating head, removable bundle.
- Multi-pass tube arrangements for maximum efficiency over a wide variety of tube flow volumes.
- Standard shell sizes from 6 inches through 42 inches in diameter; custom designs up to 60 inches in diameter.
- Available for horizontal or vertical mounting.

ADVANTAGES:

Higher heat transfer surface area per given shell and tube size than pull-through designs (AET or BET Types).

Allows for differential thermal expansion between the shell and tubes.

Lack of packed joints allows for handling volatile and/or toxic fluids.

Provides multi-pass tube arrangements.

Bundle can be removed for shell side cleaning and maintenance.

LIMITATIONS:

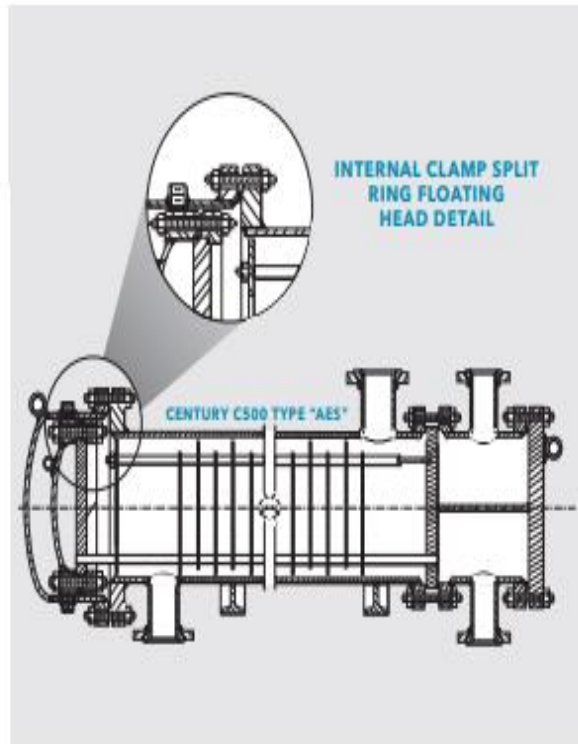
Shell cover, clamp ring and floating head cover must be removed prior to removing bundle. This results in higher maintenance cost compared to "pull-through" designs (AET or BET)

More costly than fixed tubesheet and U-tube designs.

TEMA Type AES or BES.

Can meet TEMA "B", "C" and "R", ASME Section VIII Div. 1 and ASME Section III "N" stamp.

CENTURY® C500



CENTURY® C500 STANDARD DESIGN CAPABILITIES

	DESIGN PRESSURE	DESIGN TEMPERATURE
Tube Side	75 - 450 psi 517 - 3,102 kPa	-20 - 650°F -29 - 343°C
Shell Side	75 - 300 psi 517 - 2,068 kPa	-20 - 650°F -29 - 343°C

Note: Custom designs to 3,600 psi/24,816 kPa and 1000°F/538°C, depending on shell diameter and design temperature.

ANEXOS 17: Ficha técnica de la turbina y generador.

Industrial steam turbines

The comprehensive Siemens product range from 2 to 250 megawatts



SST-100

up to 8.5 MW

The SST-100 is a single-casing turbine, geared for generator drive; pre-engineered including blading as a cost-effective solution. Mainly used for industrial applications.

Technical data

- Power output up to 8.5 MW
- Inlet pressure up to 65 bar/945 psi
- Inlet temperature up to 480° C/895° F
- Rotational speed up to 7,500 rpm
- Exhaust pressure (back pressure) up to 10 bar/145 psi
- Exhaust pressure (condensing) up to 1 bar/14.5 psi
- Exhaust area 0.22 m²/2.4 sq. ft.



SST-150

up to 20 MW

The SST-150 is a single-casing turbine, providing geared drive to a 1,500 or 1,800 rpm generator and packaged in a skid-mounted design. For power generation, it provides high efficiency together with a very compact arrangement.

Technical data

- Power output up to 20 MW
- Inlet pressure up to 103 bar/1,495 psi
- Inlet steam temperature up to 505° C/940° F
- Rotational speed up to 13,300 rpm
- Bleed up to 25 bar/365 psi
- Controlled extraction up to 16 bar/230 psi
- Exhaust pressure (back pressure) up to 10 bar/145 psi
- Exhaust pressure (condensing) up to 0.25 bar/3.6 psi
- Exhaust area 0.28 – 1.6 m²/3.0 – 17.2 sq. ft.



SST-200

up to 10 MW

The SST-200 is a single-casing turbine, geared or with direct drive suited to both generator and mechanical drives. Used for industry and power generation applications.

Technical data

- Power output up to 10 MW
- Inlet pressure up to 110 bar/1595 psi
- Inlet temperature up to 520° C/970° F
- Controlled extraction up to 16 bar/230 psi and up to 350° C/560° F
- Bleed up to 60 bar/870 psi
- Exhaust pressure (back pressure) up to 16 bar/230 psi
- Exhaust pressure (condensing) up to 0.25 bar/3.6 psi
- Exhaust area 0.17 – 0.34 m²/1.8 – 3.7 sq. ft.

ANEXOS 18: Precio de venta de la energía a nivel de generación.

Barra de Referencia de Generación	Tensión kV	PPM S/ /kW-mes	PCSPT S/ /kW-mes	PEMP ctm. S/ /kWh	PEMF ctm. S/ /kWh
Cachimayo	138	20,67	35,076	16,76	14,76
Cusco	138	20,67	35,076	16,83	14,80
Combapata	138	20,67	35,076	17,03	15,01
Tintaya	138	20,67	35,076	17,15	15,19
Tintaya Nueva	220	20,67	35,076	17,13	15,17
Ayaviri	138	20,67	35,076	16,82	14,85
Azángaro	138	20,67	35,076	16,63	14,67
San Gabán	138	20,67	35,076	15,69	13,88
Mazuco	138	20,67	35,076	15,91	14,03
Puerto Maldonado	138	20,67	35,076	16,50	14,41
Juliaca	138	20,67	35,076	16,82	14,83
Puno	138	20,67	35,076	16,82	14,84
Puno	220	20,67	35,076	16,80	14,84
Callalli	138	20,67	35,076	17,14	15,21
Santuario	138	20,67	35,076	16,84	14,96
Arequipa	138	20,67	35,076	16,89	14,97
Socabaya	220	20,67	35,076	16,86	14,95
Cotaruse	220	20,67	35,076	16,53	14,59
Cerro Verde	138	20,67	35,076	16,94	15,00
Repartición	138	20,67	35,076	17,02	15,02
Mollendo	138	20,67	35,076	17,12	15,08
Moquegua	220	20,67	35,076	16,81	14,92
Moquegua	138	20,67	35,076	16,82	14,93
Ilo ELS	138	20,67	35,076	16,95	15,02
Botiflaca	138	20,67	35,076	16,90	15,01
Toquepala	138	20,67	35,076	16,91	15,04
Aricota	138	20,67	35,076	16,79	15,01
Aricota	66	20,67	35,076	16,71	14,98
Tacna (Los Héroes)	220	20,67	35,076	16,92	14,99
Tacna (Los Héroes)	66	20,67	35,076	17,03	15,04

Dónde:

PPM : Precio de la Potencia de Punta a Nivel Generación,

PEMP : Precio de la Energía a Nivel Generación en Horas de Punta para las Barras de Referencia de Generación,

PEMF : Precio de la Energía a Nivel Generación en Horas Fuera de Punta para las Barras de Referencia de Generación, y

PCSPT : Peaje de Conexión al Sistema Principal de Transmisión y Peaje de Transmisión al Sistema Garantizado de Transmisión.