

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Evaluación técnico-financiera de un distrito térmico para una zona residencial en
Barrancabermeja

Laura Sofía Sandoval Granados y Andrés Leonardo Vergel Pérez

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico
Modalidad Investigativa

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Faculta de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2025

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Dedicatoria

Luego de todos estos años de estudio solo me queda agradecer a las personas que me acompañaron y guiaron en este camino. Primero que todo gracias a mi mamá Esperanza, mi luz y mi guía en toda mi vida, la que da todo y más por verme feliz, ella es el motivo de ser quien soy hoy en día. A Valentina, mi prima casi hermana, gracias por confiar en mí incluso cuando yo no lo hago, por ser mi compañera de vida, por acompañarme en las alegrías y motivarme en las tristezas. A mis tíos, Pilar, Marcela y Jose Luis, quienes nunca dudaron de lo que podría lograr. A mi nono Octavio, quien con paciencia y amor me enseñó que de los errores solo queda aprender y no vivir de ellos, y aún desde el cielo sigue guiándome.

Gracias a todos mis amigos de la U, gracias a Lau, la primera amiga que conocí y me acompañó hasta mi último día de carrera, donde ambas sabemos y confiamos en las capacidades de la otra, a Leonardo, mi amigo y compañero de tesis, quien ha sido una mano amiga cuando lo he necesitado, brindando siempre su apoyo. A Juanfer, Jenri, Mateo, Juan Diego, Mike, Junior y Silvia, gracias porque con ustedes la vida se siente más bonita, y los problemas pesan menos, gracias por su apoyo incondicional.

Barrancabermeja me brindó experiencias y personas maravillosas, gracias Cristian, Mafe y Dieguito, porque en ustedes encontré el amor y cariño en una ciudad desconocida. Gracias a los ingenieros Adrián, Leonardo y Efraín, por enseñarme que un buen profesional es integral y bondadoso.

Por último, pero no menos importante, gracias a los amigos que me acompañaron desde el colegio, Angie quien ha sido mi mejor amiga, mi confidente, mi apoyo, consejera y muchas cosas más, quien puedo decir que es la familia que he elegido más allá de los lazos de sangre. A los gemelos, Juan Daniel y Juan David, quienes me brindaron su apoyo y compañía durante toda la carrera.

Dios y la vida se encargan de poner personas maravillosas en el camino y por ello doy gracias.

Laura Sofía

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

A mi madre y mi padre que siempre me brindaron su apoyo incondicional y me acompañaron en todo este proceso que hicieron de mi la persona que soy hoy en día. Muchas gracias, papá por ser mi ejemplo desde que era niño.

A mis compañeros que hicieron de estos 5 años un lugar mucho más ameno y agradable. En especial a Mateo, Valentina Bueno, Valentina Mendoza, Melissa los cuales más que colegas, son amigos que llevo en mi corazón. Gracias Sofía por acompañarme desde segundo semestre, por brindarme tu amistad y ser mi compañera en este presente trabajo.

Por último, Paula, eres lo más valioso que obtuve en mi paso por la UIS, desde ese diciembre en que nos conocimos entraste en mi corazón y me brindaste todo tu amor día a día, siendo un pilar en mi vida. Me acompañaste en la universidad, me acompañaste en este trabajo y espero que me sigas acompañando en mi vida. Te amo.

Leonardo Vergel

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Agradecimientos

Queremos agradecer a la escuela de ingeniería química, quien nos guio en estos años de carrera, brindando óptimos espacios de estudio. Gracias al profesor Giovanni Morales, su compañía y apoyo nos lleva a obtener el título de ingenieros químicos, con un trabajo de grado que lleva todo nuestro esfuerzo encaminado a su sabiduría como profesional.

Gracias a Ecopetrol, por abrirnos sus puertas para realizar nuestras prácticas profesionales, llevándonos a vivir experiencias únicas en una ciudad desconocida para nosotros, de la mano de excelentes profesionales y seres humanos, siempre dispuestos a enseñar.

Por último, gracias a la Universidad Industrial de Santander, por ser nuestra alma matter y brindarnos una educación de calidad, solo nos queda agradecer por lo vivido y lo aprendido.

Tabla de contenido

Introducción

1.	Objetivos.....	14
1.1.	Objetivo general.....	14
1.2.	Objetivos específicos	14
2.	Estado del arte.....	14
3.	Metodología	17
3.1.	Fase 1: Caracterización de los requerimientos de enfriamiento	17
3.2.	Fase 2: Diseño conceptual	18
3.3.	Fase 3: Evaluación financiera.....	20
4.	Resultados.....	23
4.1.	Dimensionamiento de la bomba de calor.....	23
4.2.	Alternativas.....	25
4.2.1	Alternativa 1.....	25
4.2.2	Alternativa 2.....	28
4.2.3	Diseño de la alternativa seleccionada	32
4.3.	Análisis financiero	37
5.	Conclusiones.....	42
6.	Recomendaciones	43

Referencias bibliográficas

Apéndices

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Comparación de las propiedades de los refrigerantes empleados</i>	18
Tabla 2. <i>Decisiones, suposiciones y aproximaciones tomadas para el desarrollo del proyecto</i>	22
Tabla 3. <i>Condiciones operativas alternativa 1 R450a</i>	27
Tabla 4. <i>Condiciones operativas alternativa 1 R600a</i>	28
Tabla 5. <i>Condiciones operativas alternativa 2 R450a</i>	30
Tabla 6. <i>Condiciones operativas alternativa 2 R600a</i>	30
Tabla 7. <i>Análisis de seguridad (Figura 10)</i>	34
Tabla 8. <i>Especificaciones de las líneas P&ID de la Figura 10</i>	35
Tabla 9. <i>Lazos de control (Figura 10)</i>	35
Tabla 10. <i>Parámetros de diseño alternativa seleccionada (Figura 10)</i>	36
Tabla 11. <i>Costos fijos para los equipos de la Figura 10</i>	37
Tabla 12. <i>Análisis de sensibilidad</i>	39
Tabla 13. <i>Análisis de riesgo de los tres escenarios</i>	40
Tabla 14. <i>Especificaciones condensador</i>	50
Tabla 15. <i>Especificaciones evaporador</i>	51
Tabla 16. <i>Especificaciones válvulas de seguridad</i>	52
Tabla 17. <i>Anualidad por mano de obra</i>	53
Tabla 18. <i>Costos de operación (USD)</i>	54
Tabla 19. <i>Ingresos de producción (USD)</i>	54

Lista de figuras

Figura 1. <i>Esquema de un distrito térmico.</i>	15
Figura 2. <i>Esquema metodología</i>	17
Figura 3. <i>Esquema alternativas de diseño</i>	19
Figura 4. <i>Consumo por usuario de energía eléctrica suministrada por la Electrificadora de Santander S.A E.S.P.</i>	23
Figura 5. <i>Proyección de usuarios de energía eléctrica por estrato en Barrancabermeja</i> 24	
Figura 6. <i>PFD y gráfico Log(P) vs Entalpía con R450a, primera alternativa</i>	26
Figura 7. <i>PFD y gráfico Log(P) vs Entalpía con R600a, primera alternativa</i>	26
Figura 8. <i>PFD y gráfico Log(P) vs Entalpía con R450a, segunda alternativa</i>	28
Figura 9. <i>PFD y gráfico Log(P) vs Entalpía con 600a, segunda alternativa</i>	29
Figura 10. <i>Comparación de alternativas</i>	31
Figura 11. <i>P&ID Alternativa seleccionada.</i>	32
Figura 12. <i>Plot plant alternativa seleccionada.</i>	33
Figura 13. <i>Flujo neto de caja</i>	38

Lista de apéndices

Apéndice A Especificaciones de los equipos	50
Apéndice B. Evaluación financiera.....	52

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Glosario

BCM: Miles de millones de metros cúbicos

COP: Coeficiente de rendimiento

COP Ref: Coeficiente de rendimiento para refrigeración

DC: Distrito de enfriamiento

GLP: Gas licuado de petróleo

ROI: Retorno de inversión

ODS: Objetivos de desarrollo sostenible

TIR: Tasa interna de retorno

TR: Toneladas de refrigeración, unidad nominal de potencia para medir la demanda o capacidad de enfriamiento.

VPN: Valor presente neto

Resumen

Título: Evaluación técnico-financiera de un distrito térmico para una zona residencial en Barrancabermeja*

Autores: Laura Sofia Sandoval Granados, Andrés Leonardo Vergel Pérez**

Palabras Clave: Bombas de calor, Distrito Térmico.

Descripción:

En esta investigación se evalúan dos configuraciones de bombas de calor para suplir el requerimiento energético en sistemas de enfriamiento de 50 hogares en Barrancabermeja. Esto contribuye al protocolo de Montreal para proteger la capa de ozono, a su vez se alinea a los compromisos del país hacia energías más limpias, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, como lo es el CO₂. Se plantean objetivos específicos como caracterizar, diseñar conceptualmente una bomba de calor, el cual contemple las heurísticas de diseño y se complemente con simulaciones en Aspen Hysys, y la evaluación del proyecto desde los resultados técnicos obtenidos anteriormente y a través de indicadores financieros como VPN, TIR, ROI y *Payback*.

Los resultados indican que el proyecto se alinea técnicamente con todos los requerimientos y las iniciativas de transición energética, donde a su vez muestra un ahorro económico al emplear estos sistemas de refrigeración centralizada.

Se resalta la importancia de seleccionar una adecuada configuración de la bomba de calor dependiendo de los requerimientos de cada caso, así como el uso del fluido del proceso adecuado para obtener operaciones óptimas, los cuales en este caso fueron R450a y R600a.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Doctor en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Technical and financial evaluation of a thermal district for a residential area in Barrancabermeja*

Authors: Laura Sofia Sandoval Granados, Andrés Leonardo Vergel Pérez**

Keywords: Heat pumps, Thermal district.

Description:

This research evaluates two heat pump configurations to meet the energy requirements of cooling systems in 50 homes in Barrancabermeja. This contributes to the Montreal Protocol to protect the ozone layer and is in line with the country's commitments to cleaner energy, reducing greenhouse gas emissions such as CO₂. Specific objectives are set out, such as characterizing and conceptually designing a heat pump that takes into account design heuristics and is complemented by simulations in Aspen Hysys, and evaluating the project based on the technical results obtained previously and through financial indicators such as NPV, IRR, ROI, and payback.

The results indicate that the project is technically aligned with all energy transition requirements and initiatives, while also showing economic savings through the use of these centralized cooling systems.

The importance of selecting an appropriate heat pump configuration depending on the requirements of each case is highlighted, as well as the use of the appropriate process fluid to obtain optimal operations, which in this case were R450a and R600a.

*Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Doctor en Ingeniería Química.

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Introducción

El impacto del cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado a nivel global la búsqueda de soluciones más sostenibles en la generación y uso de energía. Las tecnologías que proveen climatización funcionan generalmente con electricidad y refrigerantes con alto potencial de calentamiento global, las emisiones asociadas a estos sistemas representaron el 1.65% de las emisiones totales de Colombia en 2018 (Carbon trust, 2023). Una alternativa a los sistemas de enfriamiento individual son los sistemas centralizados, los distritos térmicos, una alternativa empleada en diversos países tanto para sistemas de enfriamiento como para calefacción.

Colombia es un país pionero en Latinoamérica en la promoción e implementación de los distritos térmicos, estos brindan sostenibilidad, eficiencia energética y bajo impacto ambiental, estos están regulados a través de la resolución 41286 del 30 de diciembre de 2016, que los incluye como línea de acción en los sectores industrial y terciario (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Los distritos térmicos proveen servicios energéticos de calefacción o enfriamiento a edificaciones individuales o varios hogares interconectados. Compuestos por bombas de calor que toman el calor residual de diversos procesos y cambian su temperatura hasta una que sea útil, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los distritos térmicos utilizan agua para enfriar aire y de esta manera generar la climatización necesaria, por esto es indispensable que la bomba de calor tenga la capacidad de enfriar agua desde 12 °C hasta 3 °C para el correcto funcionamiento de este (Taylor and Francis group, 2016). Las bombas de calor utilizan dos fluidos, uno que se calienta y otro que se enfría, el fluido a enfriar será agua y el fluido a calentar se utilizará GLP. El GLP es un fluido atractivo

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

debido a que este tiene una temperatura inicial de ebullición de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rednova, 2018), lo cual lo hace atractivo termodinámicamente para trabajar con refrigerantes por las temperaturas tan bajas que pueden llegar. En los últimos 6 años el precio del gas natural ha aumentado en un 70%, lo cual genera un aumento significativo en los costos industriales de la GRB (Periódico UNAL, 2025), por lo que una alternativa para manejar esto es el vaporizado de GLP en la bomba de calor para de esta manera enriquecer el gas natural, aumentando su potencial calorífico y disminuir la cantidad de gas usado.

El GLP se encuentra como subproducto del procesamiento de crudo y del gas natural. En este caso, el GLP es el encargado de recibir energía del refrigerante y con ello condensarlo para que siga su ciclo. Es una alternativa muy llamativa al gas natural, debido a que este se encuentra ahora en menor cantidad y por ende es más costoso. El GLP está compuesto principalmente por butano y propano, este no corroe el acero, ni el cobre o sus aleaciones, con una capacidad calórica de $26.43\text{ BTU/lbmol }^{\circ}\text{F}$, por ello se quiere capitalizar el rendimiento energético de este en la bomba de calor.

Dado lo anterior, en el presente documento se presentan los resultados de una evaluación técnico-financiera de un distrito térmico para una zona residencial en Barrancabermeja, en apoyo a la transición energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La pregunta de investigación definida en el desarrollo del trabajo correspondió a, ¿cuál es la viabilidad técnico-financiera de un distrito térmico en Barrancabermeja para reducir los costos energéticos de los residentes?

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnico-financiera de un distrito térmico para una zona residencial en Barrancabermeja.

1.2. Objetivos específicos

Caracterizar los requerimientos de enfriamiento para la zona residencial de Barrancabermeja, a través del análisis de los datos climáticos, las necesidades energéticas de las viviendas y el perfil de consumo, definiendo el tamaño energético de la bomba de calor.

Desarrollar un diseño conceptual del distrito térmico que cumpla con los requerimientos de enfriamiento previamente caracterizados, por aplicación de las heurísticas de diseño, las ecuaciones de balance y correlaciones semiempíricas, definiendo las dimensiones utilizadas en la predicción de costos de cada equipo.

Evaluar la viabilidad financiera del distrito térmico tomando como referencia los costos OPEX y CAPEX según diseño conceptual, así como un flujo de caja a 20 años, definiendo los indicadores financieros VPN, TIR, *payback* y ROI.

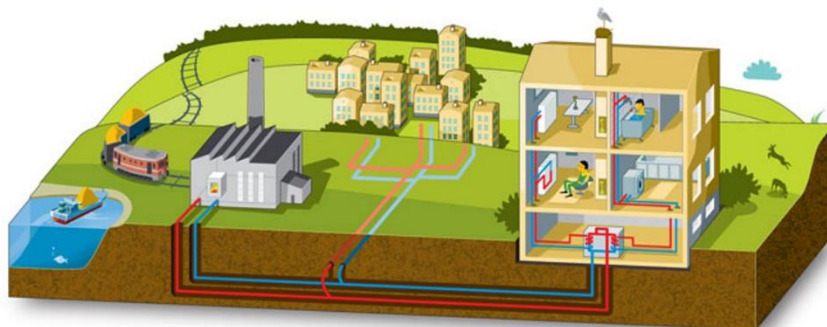
2. Estado del arte

Los distritos térmicos se basan en la centralización del suministro de calefacción o refrigeración a distintos sectores urbanos como se muestra en la Figura 1, con ellos se busca solucionar efectiva y eficientemente los requerimientos de climatización en los diversos hogares, siendo más económicos que los sistemas de climatización individuales, como los aires acondicionados. Los distritos térmicos están compuestos por bombas de calor que toman el calor residual de algún proceso industrial para aumentar o disminuir su temperatura hasta una que sea útil y se pueda enviar a los diversos hogares, estos sistemas ayudan a combatir el calentamiento

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

global al reducir la cantidad de gases de efecto invernadero emitidas al ambiente (Distrito energética, 2019).

Figura 1. *Esquema de un distrito térmico.*



Nota: Tomado de Pumps for District Heating, por Desmi, Make life flow (<https://www.desmi.com/segments/industry-utility/applications/energy-applications/district-heating/>)

Las bombas de calor emplean un ciclo de refrigeración similar al de un refrigerador o un aire acondicionado, con ella se extrae calor de una fuente externa y luego es suministrado a una red de distribución para llegar a su lugar de consumo. Usualmente se emplean combustibles fósiles en los calefactores, los cuales son muy contaminantes, según la International Energy Agency (2022), la unión europea lograría reducir la demanda de gas en 7 BCM para 2025 y 21 BCM para 2030, contribuyendo a los objetivos climáticos y de seguridad energética. De las barreras más grandes para la aplicación de las bombas de calor en sistemas de refrigeración es el rendimiento de estas en comparación a los sistemas convencionales, por lo tanto, es necesario el estudio de la

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

viabilidad tanto técnica y financiera para garantizar un funcionamiento adecuado y limpio de la alternativa energética en aplicaciones de climatización urbana.

El uso de bombas de calor en sistemas de “district heating and cooling” ha sido objeto de diversas investigaciones. Xu et al. (2020) llevaron a cabo un estudio experimental sobre el uso de una bomba de calor de doble efecto para la recuperación de calor residual industrial en un sistema de calefacción distrital en China. El equipo utilizado, capaz de trabajar con temperaturas de recuperación cercanas a los 35 °C, demostró una eficiencia notable con un COP de 2.62 al elevar la temperatura del agua de retorno de 45°C a 60 °C, lo que permitió su reintegración en el sistema de calefacción distrital. En este sistema se operó a condiciones de 0.6 MPa con vapor como fluido en el ciclo de la bomba de calor y fue utilizado bromuro de litio como absorbente.

Por su parte, Zhang et al. (2021) propusieron un marco de optimización para integrar el calor residual de baja temperatura con sistemas de calefacción y refrigeración distritales. Utilizaron un método de programación matemática para diseñar y optimizar la operación de un sistema multiperiodo, evaluando tanto la demanda de calor en invierno como de frío en verano. Su modelo demostró que es posible reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia del sistema al implementar bombas de calor junto con intercambiadores de calor y sistemas de refrigeración por absorción.

Zang et al. (2021) también investigaron el uso de bombas de calor para sistemas de calefacción distrital, centrandó su análisis en la conversión de calor residual en áreas industriales. Utilizando un sistema de bomba de calor centrífuga con R134a como refrigerante, recuperaron calor residual de agua a 32 °C y lograron calentar agua hasta 62 °C con un COP de 6.13. Aunque sus resultados fueron prometedores, destacaron que la integración de este tipo de tecnología

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

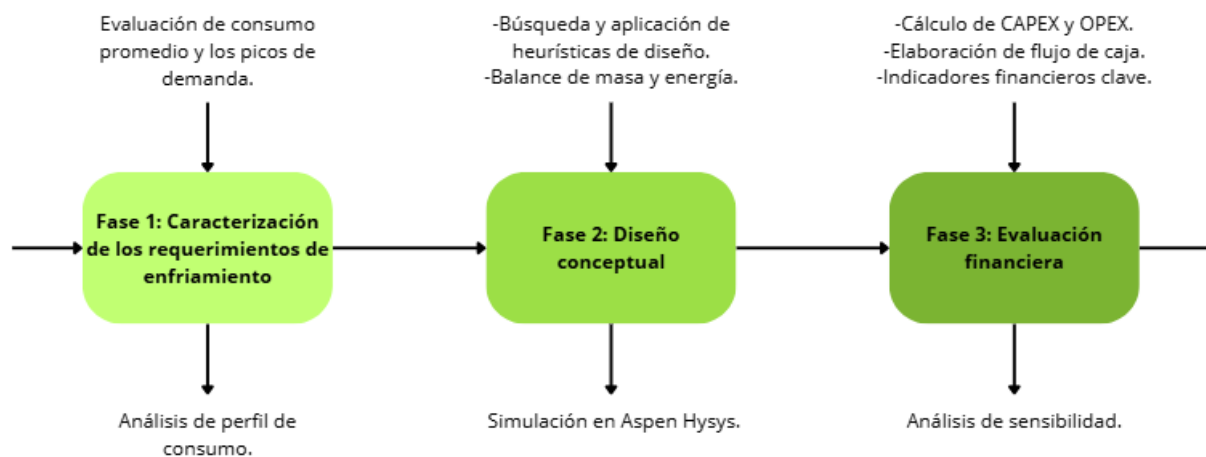
requiere una mayor investigación sobre la compatibilidad con diferentes tipos de demanda energética en los distritos.

A pesar de los avances en la tecnología de bombas de calor, un desafío común señalado en estas investigaciones es la necesidad de mejorar la recuperación de calor a largo plazo y en distancias mayores, con sistemas que tengan eficiencias altas y buena rentabilidad. Además de esto, se ve que las bombas de calor con absorción son atractivas debido a que estas trabajan sin la necesidad de un refrigerante, donde se usa como flujo de trabajo bromuro de litio y agua para el ciclo de este sistema. Por último, diversos países han implementado estas redes de calefacción, uno de ellos es China, según la revisión bibliográfica realizada por Lund, et al. (2024).

3. Metodología

La Figura 2 muestra un resumen esquemático de la metodología presentada en el proyecto.

Figura 2. *Esquema metodología*



3.1. Fase 1: Caracterización de los requerimientos de enfriamiento

Actividad 1. Determinación de requerimientos energéticos en las viviendas analizando el consumo promedio mensual de energía eléctrica por estrato en Barrancabermeja. Esto a partir del

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Estudio Técnico para la Determinación de Costos Estimados del Servicio Público en el Distrito de Barrancabermeja.

Actividad 2. Análisis del perfil de consumo energético de los hogares que formarán parte del distrito térmico, utilizando la información del *Plan de Desarrollo Distrital Barrancabermeja 2024–2027*. En este se registran los suscriptores promedio por estrato hasta 2021 y se proyectan hasta 2024. Adicionalmente, en base al estudio sobre la demanda de enfriamiento en Colombia realizado por *Carbon Trust (2023)*, se determina el porcentaje de energía destinado al enfriamiento en ciudades con condiciones similares a las de Barrancabermeja.

Actividad 3. Determinación del requerimiento energético de la bomba de calor, considerando los hogares que se conectarán al sistema de enfriamiento para el barrio El Rosario, ubicado dentro del área de influencia de la refinería de Barrancabermeja. Este sector cuenta con 203 viviendas distribuidas en tres barrios: 25 de agosto, Yariguíes y El Rosario.

3.2. Fase 2: Diseño conceptual

Actividad 1. Evaluación de dos alternativas de bombas de calor para un diseño preliminar del sistema, así mismo se evalúan con los refrigerantes R450a y R600 mostrados en la Tabla 1, para así escoger la opción más viable, ello mediante revisión bibliográfica en bases de datos documentales.

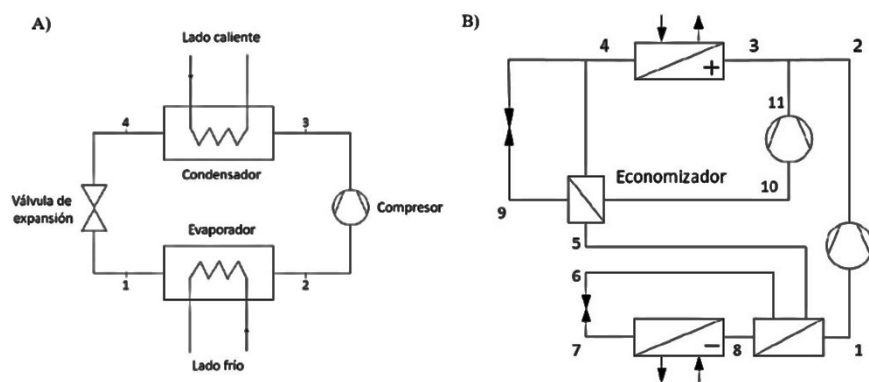
Tabla 1. *Comparación de las propiedades de los refrigerantes empleados*

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Propiedades	R450a	R600a
Composición	trans-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-eno (R-1234ze) 58% en peso. 1,1,1,2-Tetrafluoroetano (R-134a) 42% en peso.	<i>Iso</i> -butano
Potencial de calentamiento global (GWP)	604	3
Potencial de agotamiento del ozono (ODP)	0	0
Seguridad	Poca toxicidad (nivel de riesgo A1)	Extremadamente inflamable, no es tóxico ni daña la capa de ozono, pero se debe proteger el área para evitar ignición (nivel de riesgo A3).
Eficiencia energética	Similar al R134a, con un ahorro de energía del 2.9% al 3.1%	Menor consumo energético; buen desempeño de intercambio térmico; buena capacidad de evaporación.
Sustitución de otros refrigerantes	R-134a	R-12 y R-134a (donde la inflamabilidad puede ser manejada).

Evaluación de dos alternativas de diseño, las cuales se pueden observar en la Figura 3, donde la Figura 3A corresponde a la alternativa 1 y la Figura 3B corresponde a la alternativa 2.

Figura 3. Esquema alternativas de diseño



EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Actividad 2. Simulación del proceso aplicando heurísticas y balances de masa y energía, por medio del programa Aspen Hysys

El refrigerante R450a es una mezcla de R1234ze (58% en peso) y R134a (42% en peso), por eso en Aspen Hysys se creó un componente hipotético, para poder tener sus propiedades más precisas, debido a que el R450a no está directamente como un componente ya establecido. El refrigerante R600a es tomado como *iso*-butano.

3.3. Fase 3: Evaluación financiera

Actividad 1. La selección de la alternativa se realizó con criterios técnicos para proceder con un análisis más detallado y su análisis económico. Uso de los datos obtenidos en la simulación del diseño conceptual para calcular el CAPEX, el diámetro de las tuberías se calcula con la ecuación de continuidad para el caudal manteniendo la velocidad indicada en la literatura (Perry, R., 2019). El costo de capital de los equipos se calculó con el método de Guthrie (Valor de referencia), ello se llevó a valor en 2024 ajustándolo con el factor de corrección de tiempo (CEPCI). Para hallar el costo de la planta completa, se emplea el método de costo modular, realizando una sumatoria de los costos de cada uno de los equipos. El OPEX, según la literatura se pueden aproximar al 3% del CAPEX (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Según el artículo 12 de la Ley 1715 de 2014, estos equipos se encuentran exentos del IVA. Así mismo, el artículo 13 establece que los equipos empleados se encuentran exentos de aranceles debido a que el proyecto apalanca el uso eficiente y racional de la energía. A su vez, el artículo 14 indica que la depreciación es del 33.33% durante los primeros 3 años del proyecto. Esta depreciación se toma como un ahorro en deducción de impuestos.

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Los costos de instalación se tomaron como el 10% del total de los activos fijos (Peters y Timmerhaus, 1991) y los costos de mantenimiento de equipos un 2% de los activos fijos anualmente (Peters y Timmerhaus, 1991).

Actividad 2. Elaboración del flujo de caja proyectado a 20 años, considerando la inflación promedio de los últimos 5 años, a su vez, la GRB suministra los servicios industriales y el costo de terreno, se empleará mano de obra y costos de mantenimiento. Esto se calculó, pero se considera que esta mano de obra es suministrada por Ecopetrol, por ello no se añade en los costos del proceso. Los servicios industriales asociados a la turbina del compresor son a su vez suministrados por Ecopetrol. El OPEX se tomó del 3% del CAPEX (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2020).

Actividad 3. Determinación de indicadores financieros tasa interna de retorno (TIR), valor presente neto (VPN), periodo de recuperación de la inversión (*Payback*, por su traducción al inglés) y retorno de inversión (ROI).

Para el cálculo del VPN se empleó la Ecuación 1, donde C_0 es la inversión inicial o CAPEX, F_t son los flujos efectivos en cada periodo, r es la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) y t es el periodo o año en el que se recibe el flujo efectivo.

$$VPN = \sum \frac{F_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (1)$$

La TIR es la tasa de descuento que logra que el VPN sea igual a 0, por ello se iguala la Ecuación 1 a 0 y allí se despeja r , que en este caso equivale a la TIR. Para el cálculo del *Payback* se emplea la Ecuación 2, donde a es el periodo inmediatamente anterior para recuperar la inversión, b es la suma de todos los flujos de caja hasta el periodo a y F_a es el flujo de caja en el periodo en el que se recupera la inversión.

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

$$Payback = a + \frac{C_0 - b}{F_a} \quad (2)$$

ROI es el beneficio neto entre el costo de la inversión, como se observa en la Ecuación 3.

$$ROI = \frac{VPN}{C_0} * 100 \quad (3)$$

La Tabla 2 compila las consideraciones técnicas y financieras asumidas para el desarrollo del trabajo de grado.

Tabla 2. Decisiones, suposiciones y aproximaciones tomadas para el desarrollo del proyecto.

Consideraciones	Referencia
Requerimientos y simulación	
50 hogares del barrio El Rosario para el dimensionamiento de la bomba de calor.	
Cada hogar estrato 5 consume 1.13 MMBTU/h.	Gobierno distrital, Barrancabermeja, 2024
El 45% de la energía eléctrica es usada para sistemas de enfriamiento.	Carbon Trust, 2023
El costo de la energía eléctrica es de \$ 0.42 USD/kWh.	ObservadoresCol, Data & Analytics, 2024
Sobredimensionamiento del 20% de la capacidad de la bomba de calor.	Branan, C., 1994
Dimensionamiento del compresor por el método de simulación Shortcut.	
Dimensionamiento de tuberías según velocidades admisibles y su flujo, por ecuación de continuidad.	Perry, R., 2019
TEMA type AKT, intercambiador de calor alternativa 1.	Branan, C., 1994
TEMA type BEM, intercambiador de calor alternativa 2.	Branan, C., 1995
La caída de presión en los intercambiadores es de 15 psia lado tubos y 10 psia lado casco.	Branan, C., 1994
El R450a se creó como un componente hipotético en Aspen Hysys.	
Modelo termodinámico Peng-Robinson para hidrocarburos y agua.	
Modelo termodinámico PRSV para refrigerantes.	
CAPEX	
Los equipos están exentos del IVA.	Artículo 12 de la Ley 1715 de 2014
Los equipos empleados se encuentran exentos de aranceles.	Artículo 13 de la Ley 1715 de 2014

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

La depreciación es de 33.33% durante los primeros 3 años del proyecto. Artículo 14 de la Ley 1715 de 2014

Mano de obra suministrada por Ecopetrol, por ello no se tiene en cuenta en el análisis financiero.

Los servicios industriales asociados a la turbina del compresor son suministrados por Ecopetrol.

Los costos de instalación son el 10% de los activos fijos. Peters y Timmerhaus, 1991

Cálculo de CAPEX con el método de Guthrie.

El CAPEX se ajustó con el CEPCI 2024.

Costo de válvulas, tanques de almacenamiento, sensores y bombas tomados de Alibaba.

OPEX

El OPEX se toma como el 3% del CAPEX. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020

Los costos de mantenimiento de equipos son un 2% de los activos fijos anuales. (Peters y Timmerhaus, 1991).

Análisis financiero

Inflación del 5%. Promedio de los últimos 5 años (DANE)

El nivel de producción crece gradualmente de 80% a 100% en los primeros 5 años.

TMAR del 7%. WACC nominal (IEA, 2023)

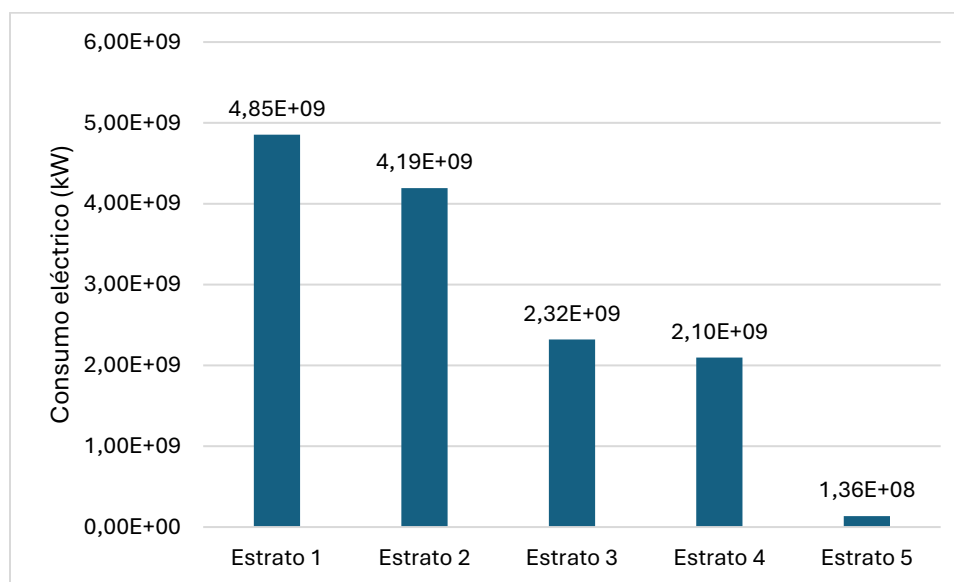
4. Resultados

4.1. Dimensionamiento de la bomba de calor

En la Figura 4 se registra el consumo de energía eléctrica (kW) por estrato en Barrancabermeja, allí los principales consumidores son el estrato 1 y 2, donde el estrato 5 registra un consumo promedio de 135'513,591 kW por mes, el cual es el que menos consume.

Figura 4. Consumo por usuario de energía eléctrica suministrada por la Electrificadora de Santander S.A E.S.P.

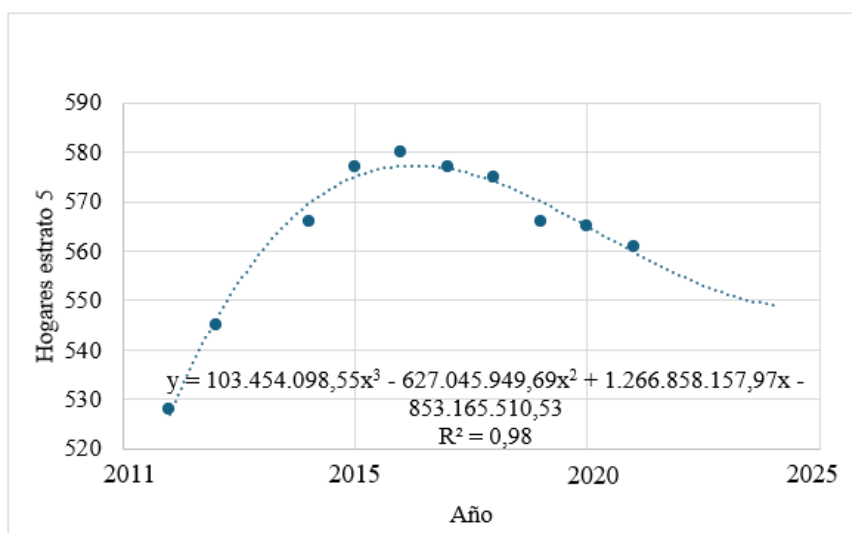
EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO



Nota: Tomado adaptado de *Estudio Técnico para la Determinación de Costos Estimados del Servicio Público en el Distrito de Barrancabermeja*.

El número de usuarios proyectados para el año 2024 se presenta en la Figura 5, arrojando 549 hogares estrato 5 conectados a la red eléctrica. El consumo energético por hogar estrato 5 es igual a 1.13 MMBTU/h, de las cuales aproximadamente 0.51 MMBTU/h son usadas para enfriamiento.

Figura 5. Proyección de usuarios de energía eléctrica por estrato en Barrancabermeja



EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Nota: Elaboración propia.

Para el diseño se tomaron 50 casas con un sobredimensionamiento del 20%. Con ello, la muestra arrojó un requerimiento de 30.55 MMBTU/hora, donde luego de revisar la bibliografía se obtuvo que es necesaria una sola bomba de calor, ya que no es demasiado alto para provocar problemas mecánicos, fenómenos de transferencia o problemas de ensuciamiento. Con ese requerimiento energético que suple la bomba de calor están representadas 23.4 toneladas de CO₂ equivalente por año, apoyando a la mitigación de los gases de efecto invernadero.

4.2. Alternativas

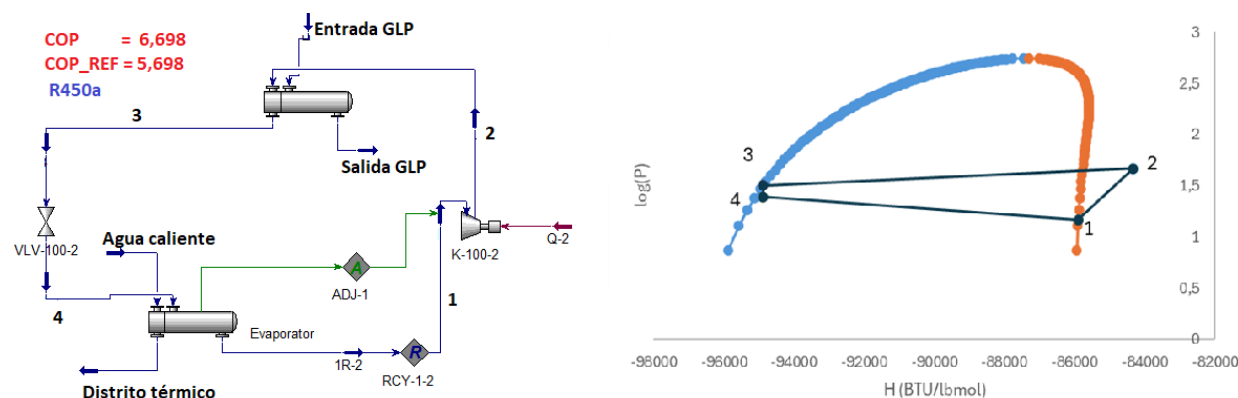
4.2.1 Alternativa 1

La Figura 6 presenta el PFD desarrollado en Aspen Hysys para la Alternativa 1 utilizando el refrigerante R450a. En el PFD, el flujo de 1,610 m³/h de GLP proveniente de la refinera ingresa al intercambiador E-100 a -27 °C y 344.7 kPa en fase líquida, recibiendo 35.92 MMBTU/h, con lo cual sale a -10 °C, 275.8 kPa y una fracción de vapor del 2%. El contenido energético ganado por el GLP en su proceso de vaporización es obtenido por contacto térmico con el refrigerante R450a (fluido de trabajo de la bomba de calor). El R450a pasa por una válvula sufriendo una expansión isoentálpica o también conocido como efecto Joule-Thompson, disminuyendo su temperatura en 6.4 °C y vaporizando una parte del fluido como se ve en el diagrama log(P) vs H. El evaporador lleva el R450a hasta su punto de rocío, aprovechando todo su calor latente para el enfriamiento del agua. Por último, el refrigerante en estado vapor entra al compresor para aumentar su presión hasta 321.98 kPa lo cual se puede observar en la pendiente presentada entre 1 y 2 en la gráfica log(P) vs H de la Figura 6. El COP de refrigeración por simulación reportó un valor de 5.698. por encima del dato reportado en literatura de 4.92 (Alarnaout G, et al., s.f.). Esta desviación

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

del 14% obtenido con la simulación, puede deberse a la eficiencia en el compresor y a la menor escala del reporte.

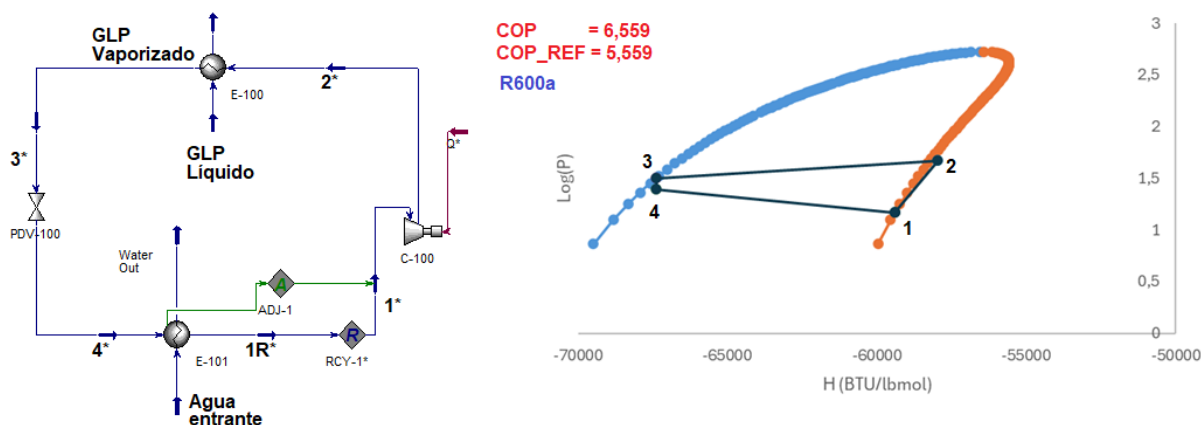
Figura 6. PFD y gráfico $\text{Log}(P)$ vs Entalpía con R450a, primera alternativa



El refrigerante R600a tiene un rendimiento de refrigeración de 5.559, como se muestra en la Figura 7. Al comparar el rendimiento de los dos refrigerantes, se puede observar que el refrigerante R600a tiene menor rendimiento tanto en refrigeración como en calentamiento, lo cual se puede ver ocasionado por la naturaleza del R600a. Lo anterior se observa en el diagrama presión entalpía presente en la Figura 7, entre el punto 3 y 4 se ve una vaporización mayor con respecto a la generada por el R450a, perdiendo de esta manera una mayor parte de su calor latente por la expansión isoentálpica. Este presenta una mayor entalpía respecto al R450a en la Figura 6; esta diferencia de vaporización genera que el R600a tenga un menor calor latente para entregar en el evaporador y de esta manera disminuyendo su COP de refrigeración. A nivel de rendimiento de calentamiento, la diferencia se debe a que el R450a aumenta más su temperatura, generando así una mayor entalpía para entregar en el condensador.

Figura 7. PFD y gráfico $\text{Log}(P)$ vs Entalpía con R600a, primera alternativa

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO



Las condiciones operativas para el R450a se encuentran en la Tabla 3. Se puede observar el calentamiento en el compresor, aumentado su temperatura hasta 78 °C, lo cual no llega a ser un problema operativo debido a que la temperatura crítica de este es de 104.4 °C (Gas Servei, 2024). En la sección de evaporación este tiene temperaturas entre -23 °C y -10 °C, lo cual lo hace una alternativa muy atractiva para procesos de alto enfriamiento, como es el presente caso en el cual se tiene que llevar agua desde una temperatura de 12 °C hasta 3 °C para la respectiva operación del distrito térmico (Banpaunext, 2024).

Tabla 3. Condiciones operativas alternativa 1 R450a.

Nombre	1	2	3	4
Fracción de vapor	1	1	0	0,023
Temperatura [°C]	-23.127	78.163	-4.418	-10.837
Presión [kPa]	101.325	321.985	218.564	170.300
Flujo másico [ton/h]	167.5	167.5	167.5	167.5
Flujo volumétrico como líquido [m ³ /h]	133.195	133.195	133.195	133.195
Flujo calorífico [kW]	85,612.5	84,040.7	94,569.2	94,569.2

Las condiciones operativas del R600a se encuentran en la Tabla 4, donde se observa que tiene temperaturas entre -11 y 2 °C en la sección de evaporación, haciéndolo factible para aplicar

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

en un distrito térmico, pero en comparación con el R450a este necesita de un flujo mayor; el R600a de 179 m³/h y el R450a requiere de un flujo igual a 133 m³/h.

Tabla 4. *Condiciones operativas alternativa 1 R600a.*

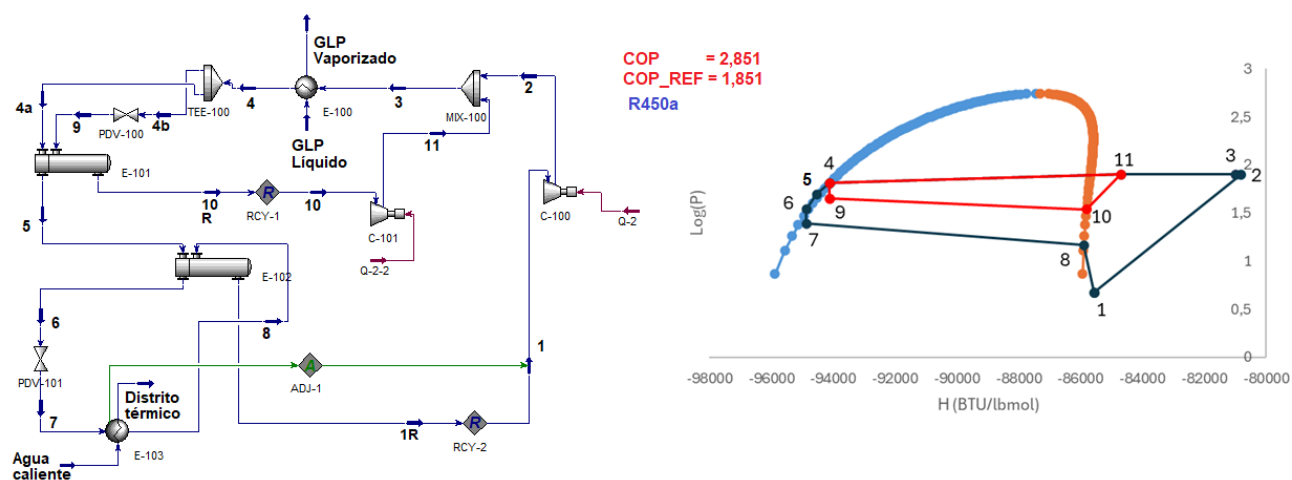
Nombre	1	2	3	4
Fracción de vapor	1	1	0	0.048
Temperatura [°C]	-11.536	28.305	9.856	2.492
Presión [kPa]	101.325	321.957	218.536	170.272
Flujo másico [ton/h]	101.1	101.1	101.1	101.1
Flujo volumétrico como líquido [m ³ /h]	179.840	179.840	179.840	179.840
Flujo calorífico [kW]	66,737.4	65,126.2	75,693.5	75,693.5

4.2.2 Alternativa 2

En la Figura 8 se puede observar el PFD obtenido en Aspen Hysys para el refrigerante R450a. Esta alternativa posee dos compresores generando así dos ciclos termodinámicos dentro de la bomba de calor y aumentando el flujo de energía obtenido por el GLP. Este entra a -27.28 °C y 344.7 kPa en fase líquida y sale a -10 °C, 275.8 kPa y 1.36% de vapor, haciéndolo una alternativa más atractiva para vaporización de GLP. Esta alternativa incorpora el economizador térmico E-102, disminuyendo la temperatura antes de la válvula de expansión y así disminuir la vaporización del refrigerante por la expansión del fluido, lo cual se puede ver por el comportamiento entre los puntos 5 y 6, generando que la vaporización del punto 6 al 7 sea mínima. El COP de refrigeración tiene un valor de 1.851, siendo este mucho menor con respecto a la primera alternativa utilizada. Esta disminución del COP se debe a que la bomba de calor intercambia la misma cantidad de calor en el E-103, pero se tiene mayor consumo energético debido al C-101 y C-100.

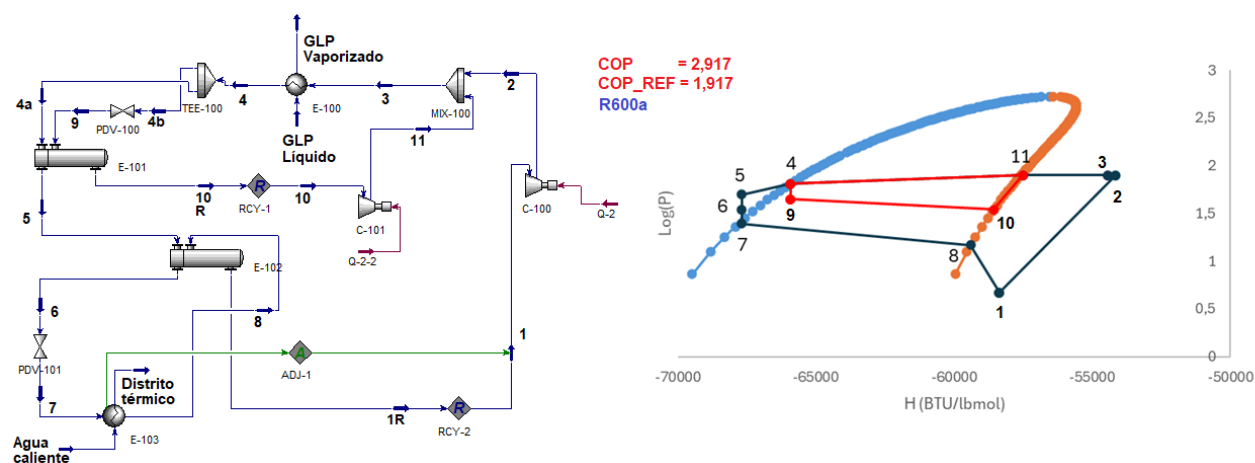
Figura 8. *PFD y gráfico Log(P) vs Entalpía con R450a, segunda alternativa*

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO



El R600a tiene un rendimiento de refrigeración de 1.917 en esta alternativa, como se muestra en la Figura 9, donde tanto en refrigeración como en calentamiento posee mayor rendimiento con respecto al R450a, aunque aún con rendimientos mucho menores al R450a con la primera alternativa, la cual tiene un rendimiento de 5.69.

Figura 9. PFD y gráfico Log(P) vs Entalpia con 600a, segunda alternativa



La Tabla 5 muestra las condiciones de operación del R450a, donde está supera su temperatura crítica en el punto 2 a la salida del compresor llegando a una temperatura de 183.8 °C, generando una caída en la eficiencia del sistema y aumentando la probabilidad de degradación térmica debido al calentamiento excesivo de los refrigerantes de bajas emisiones (Dang, Hihara &

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Ito, 2014). Además de esto sigue teniendo condiciones operativas estables para el proceso del distrito térmico, pero siendo energéticamente más costosa con respecto a la alternativa número 1. Mientras la Alternativa 1 consume 1,592 kW en promedio, la Alternativa 2 consume 4,750 kW, siendo casi el triple con respecto a la alternativa 1.

Tabla 5. *Condiciones operativas alternativa 2 R450a.*

Nombre		2	3	4	4a
Fracción de vapor	1	1	1	0	0
Temperatura [°C]	3.637	183.887	179.393	16.558	16.558
Presión [kPa]	32.405	556.407	556.407	452.986	452.986
Flujo másico [ton/h]	168.2	168.2	176.6	176.6	168.2
Flujo volumétrico como líquido [m³/h]	133.767	133.767	140.455	140.455	133.767
Flujo calorífico [kW]	85,662.3	80,888.6	85,128.5	98,894.3	94,185.1

4b	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0.029	1	0.049	1	1
16.558	5.978	-2.778	-10.839	-23.127	5.671	-1.231	67.619
452.986	349.564	246.143	170.301	101.353	315.090	246.143	556.407
8.4	168.2	168.2	168.2	168.2	8.4	8.4	8.4
6.688	133.767	133.767	133.767	133.767	6.688	6.688	6.688
4,709.2	94,600.1	94,918.1	94,918.1	85,980.3	4,709.2	4,294.2	4,239.9

La Tabla 6 muestra las condiciones operativas de esta alternativa, donde se mantienen las condiciones necesarias para la aplicación del distrito térmico, pero a diferencia del R450a, este no supera su temperatura crítica de 135 °C (Gas Servei, 2024).

Tabla 6. *Condiciones operativas alternativa 2 R600a.*

Nombre	1	2	3	4	4a
Fracción de vapor	1	1	1	0	0
Temperatura [°C]	13.379	110.428	104.635	33.513	33.513
Presión [kPa]	32.405	549.512	549.512	446.091	446.091
Flujo másico [ton/h]	97.2	97.2	106.9	106.9	97.2
Flujo volumétrico como líquido [m³/h]	172.965	172.965	190.262	190.262	172.965

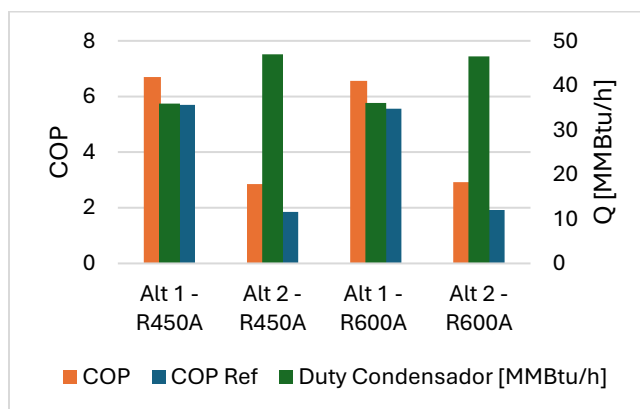
EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Flujo calorífico [kW]	63,065	58,507.7	64,721.4	78,349.3	71,226.7
------------------------------	--------	----------	----------	----------	----------

4b	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0.013	1	0.095	1	1
33.513	21.799	4.444	2.498	-11.530	20.742	12.639	42.788
446.091	342.670	239.248	170.301	101.353	308.196	239.248	549.512
9.7	97.2	97.2	97.2	97.2	9.7	9.7	9.7
17.296	172.965	172.965	172.965	172.965	17.296	17.296	17.297
7,122.7	72,021.1	73,142.3	73,142.3	64,186.1	7,122.7	6,328.2	6,213.8

La Figura 10 presenta una comparación entre las alternativas considerando los valores de COP y gasto energético. Según esta figura, la alternativa 1 presenta mayor eficiencia sin importar el refrigerante utilizado. La alternativa 2 es una alternativa más atractiva para sistemas los cuales quieran recuperar calor en el condensador o también llamado lado caliente del proceso, donde para ambos refrigerantes se generó más de 45 MMBtu/h, lo cual es más de 10 MMBtu/h en comparación con la alternativa 1. Debido a que en los distritos térmicos se utiliza el calor recibido en el evaporador, resulta mejor la alternativa 1, específicamente con el refrigerante R450a, debido a su COP de refrigeración igual a 5.698 y con una necesidad de 46 m³/h menor, como se mencionó anteriormente.

Figura 10. Comparación de alternativas

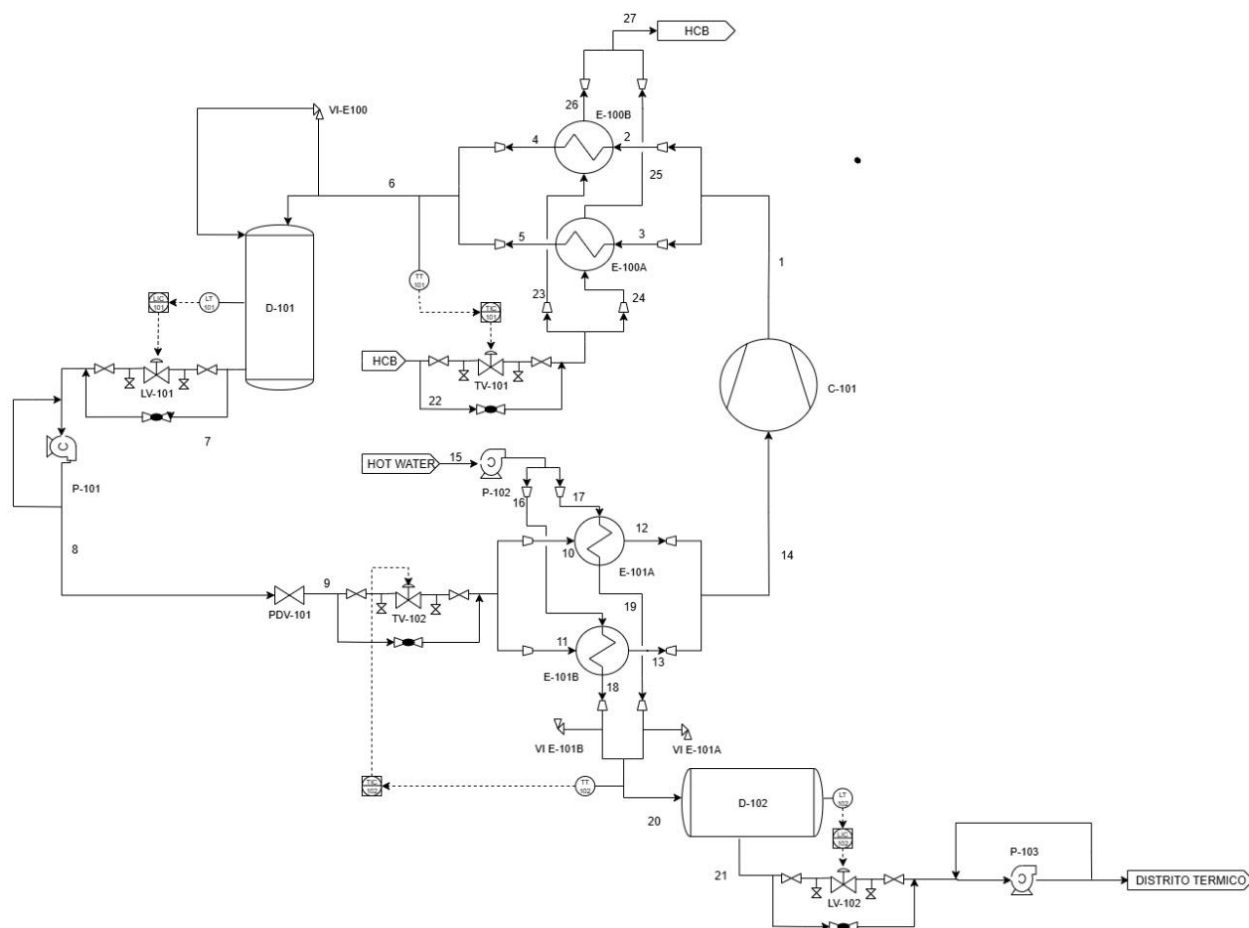


4.2.3 *Diseño de la alternativa seleccionada*

El evaporador de la Alternativa 1 corresponde a uno de tipo A (Channel and removable cover), K (Kettle type reboiler), T (Pull through floating head) horizontal con 488 tubos, respecto al condensador, es de tipo B (Bonnet integral cover) E (One pass shell) M (Fixed tubeshhet like “B” stationary head) horizontal de 541 tubos Según los resultados, el compresor cuenta con una relación de compresión de 3.18, sustentando la decisión de tomar un solo compresor Dentro del diseño se consideraron dos tanques, D-101 y D-102, ellos cumplen la función de almacenar un líquido (D-101 refrigerante y D-102 agua), el cual sea capaz de suplir durante máximo 15 minutos de operación aquel líquido por si se llega a presentar algún fallo. Esto se presenta en la Figura 11.

Figura 11. *P&ID Alternativa seleccionada. Elaborado en Diagrams.net*

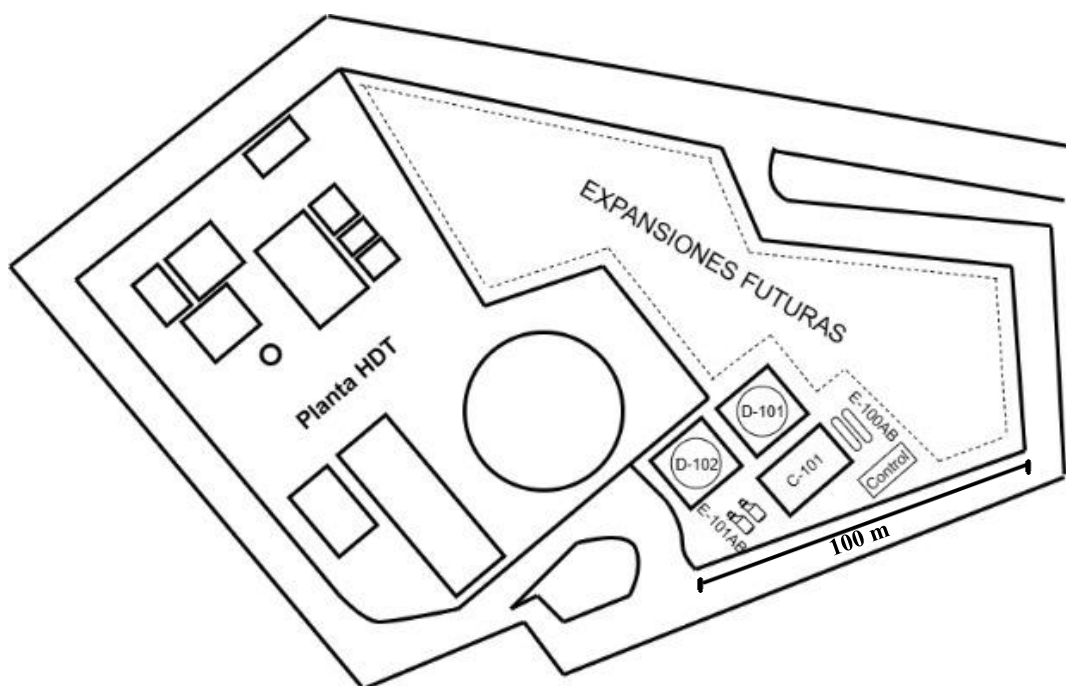
EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO



En la Figura 12 se observa la distribución de los equipos que hacen parte de la bomba de calor con su ubicación geográfica, donde la vista y las distancias se tomaron vía satelital por medio de *Google earth*, y el diagrama se realizó en *Diagrams.net*. Se tomó esta ubicación por su cercanía al barrio El Rosario, a su vez, queda cerca de la planta de GLP, también se tuvo en cuenta que el espacio fuera apto para futuras expansiones.

Figura 12. Plot plant alternativa seleccionada. Elaborado en *Diagrams.net*

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO



Se realizó un análisis de seguridad de los intercambiadores de calor, donde se obtuvo que el proceso debe tener las válvulas de seguridad presentadas en el P&ID en la Figura 11, diseñadas bajo las normas API 521 sección 4.4 y dimensionadas con ayuda del simulador Aspen Safety Analysis, la Tabla 7 muestra los resultados obtenidos para los escenarios de expansión térmica presentes en los intercambiadores E-100 AB y E-101 AB con la implementación de 4 válvulas de seguridad, válvulas de tamaño G para los intercambiadores E-100 AB y de tamaño D para los intercambiadores E-101 AB. Las especificaciones de las líneas se encuentran en la Tabla 8 (Para obtener información más detallada ver Apéndice A). La Tabla 9 presenta los lazos de control ilustrados en la Figura 11.

Tabla 7. Análisis de seguridad (Figura 10).

TAG	V1E100A	V1E100B	V1E101A	V1E101B
Conv, balanc o piloteada	Piloteada	Piloteada	Convencional	Convencional
Op Temp/ Relv. Temp [°C]	-7.354 / 22.25	7.354 / 22.25	12 / 146.3	12 / 146.3
Op Press/Set Press [barg]	2.081 / 4	2.081 / 4	0.623 / 3	0.623 / 3
Orificio selecc [cm ²]	3.245 (G)	3.245 (G)	0.0709 (D)	0.0709 (D)

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Nota: Conv: Convencional; Balanc: Balanceada; Op Temp: Temperatura de operación; Relv. Temp: Temperatura de relevo.

Tabla 89. Especificaciones de las líneas P&ID de la Figura 10.

Número	ID [in]	Servicio	Material	Aislamiento	Código línea
1	20	NR	AA1	NA	20"-NR-10001-AA1
2	16	NR	AA1	NA	16"-NR-10002-AA1
3	16	NR	AA1	NA	16"-NR-10003-AA1
4	6	NR	AA2	CC	6"-NR-10004-AA2-CC
5	6	NR	AA2	CC	6"-NR-10005-AA2-CC
6	10	NR	AA2	CC	10"-NR-10006-AA2-CC
7	10	NR	AA2	CC	10"-NR-10007-AA2-CC
8	10	NR	AA2	CC	10"-NR-10008-AA2-CC
9	10	NR	AA2	CC	10"-NR-10009-AA2-CC
10	6	NR	AA2	CC	6"-NR-10010-AA2-CC
11	6	NR	AA2	CC	6"-NR-10011-AA2-CC
12	22	NR	AA2	CC	22"-NR-10012-AA2-CC
13	22	NR	AA2	CC	22"-NR-10013-AA2-CC
14	32	NR	AA2	CC	32"-NR-10014-AA2-CC
15	14	RW	AK1	NA	14"-RW-10015-AK1
16	9	RW	AK1	NA	9"-RW-10016-AK1
17	9	RW	AK1	NA	9"-RW-10017-AK1
18	9	SW	AK1	NA	9"-SW-10018-AK1
19	9	SW	AK1	NA	9"-SW-10019-AK1
20	14	SW	AK1	NA	14"-SW-10020-AK1
21	14	SW	AK1	NA	14"-SW-10021-AK1
22	14	HC	AA1	NA	14"-HC-10022-AA1
23	10	HC	AA1	NA	10"-HC-10023-AA1
24	10	HC	AA1	NA	10"-HC-10024-AA1
25	10	HC	AA1	NA	10"-HC-10025-AA1
26	10	HC	AA1	NA	10"-HC-10026-AA1
27	14	HC	AA1	NA	14"-HC-10027-AA1

Nota: NR: Refrigerante, HC: Hidrocarburo, RW: Regreso de agua de enfriamiento, SW: Agua de enfriamiento, AA1: Acero al carbono, AA2: Acero al carbono para bajas temperaturas, AK1: Acero inoxidable 304, CC: Conservación de frío.

Tabla10 9. Lazos de control (Figura 10).

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Tag	TIC-101	TIC-102	LIC-101	LIC-102
Variable controlada	Temperatura salida refrigerante E-100	Temperatura agua hacia distrito térmico	Nivel D-101	Nivel D-102
Variable manipulada	Flujo entrada GLP	Flujo refrigerante	Flujo Refrigerante	Flujo agua hacia distrito térmico
Acción en falla	FO	FO	FO	FO
Cv requerido [gpm/$\sqrt{\text{psi}}$]	1,899.42	509.79	242.49	1,417.92
Cv max [gpm/$\sqrt{\text{psi}}$]	2,180	1,250	499	2,180
Tamaño nominal [in]	8	6	4	8
Apertura [%]	76.9	52.7	56.1	66.8
Acción controlador	Inversa	Inversa	Directa	Directa
Tipo controlador	PI	PID	PI	PI

La Tabla 10 presenta los resultados del diseño de los equipos de la alternativa seleccionada. Según esta tabla el duty del compresor es igual 1,571.88 kW, esto junto al consumo energético de las bombas corresponden a un 3% del CAPEX, dando así un OPEX de \$ 31,018 USD.

Tabla 1110. *Parámetros de diseño alternativa seleccionada (Figura 10).*

Parámetro	E-101 AB	C-101	E-100 AB	PDV
Calor intercambiado [kW]	4,110.4	-	5,315.1	-
Potencia consumida [kW]	-	1,571.88	-	-
COP	6.698	-	5.698	-
Área de transferencia [m ²]	7.5	-	15.08	-
Coefficiente global de transferencia de calor [kW/m ² °C]	846.8	-	2,684	-
Numero de tubos	488	-	541	-
Diámetro externo de la tubería [m]	0.01905	-	0.01905	-
Diámetro interno de la tubería [m]	0.01694	-	0.01694	0.05
Longitud de tubos [m]	3	-	6	-
Diámetro de la carcasa [m]	0.67	-	0.72	-
Apertura de la válvula [%]	-	-	-	50
Caída de presión de la válvula [kPa]	-	-	-	48.26
Eficiencia [%]	-	75	-	-
Número de etapas	-	1	-	-

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Capacidad [m ³ /h]	-	3.054x10 ⁴	-	-
-------------------------------	---	-----------------------	---	---

4.3. Análisis financiero

Para evaluar la factibilidad del proyecto se tomaron los costos fijos presentados en la Tabla 11.

Tabla 121. Costos fijos para los equipos de la Figura 10.

COSTOS FIJOS			
EQUIPOS	No equipos	Costo Equipo USD	Costo total USD
Condensadores (E-100A/B)	2	\$ 71,601.7	\$ 143,203.4
Evaporadores	2	\$ 47,471.7	\$ 94,943.4
Compresor	1	\$ 786,003.3	\$ 786,003.3
Tanque de almacenamiento	2	\$ 1,013.3	\$ 2,026.5
Válvulas	17	\$ 135.0	\$ 2,294.1
Sensores	4	\$ 462.6	\$ 1,850.4
Bombas	3	\$ 535.4	\$ 1,606.1
Total			\$ 1,042,312.3

Nota: Los valores son tomados de Alibaba (sin IVA), los cuales resultaron similares a los obtenidos por el programa CAPCOST, sin contar compresor ni intercambiadores de calor.

La unidad de enfriamiento cuenta con 5 equipos (cuatro intercambiadores de calor y un compresor), donde por cada equipo se necesitan 0.5 personas en unidades de refrigeración mecánica (Ulrich, 1984), por ello el número de operadores son 2.5 por turno, pero 7 operadores para cubrir el funcionamiento continuo del distrito durante todo el año, estos trabajarán 42 horas semanales (Ley 2101 de 2021), generando empleo a la comunidad local. La Tabla 17 del Apéndice B resume los costos de mano de obra anualmente, dando un total de \$78,055.6 USD/año.

Los cálculos de flujo de caja e indicadores financieros se realizaron con la plantilla del profesor Orlando Camacho presentada en el Apéndice B. Durante los primeros años se plantea que

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

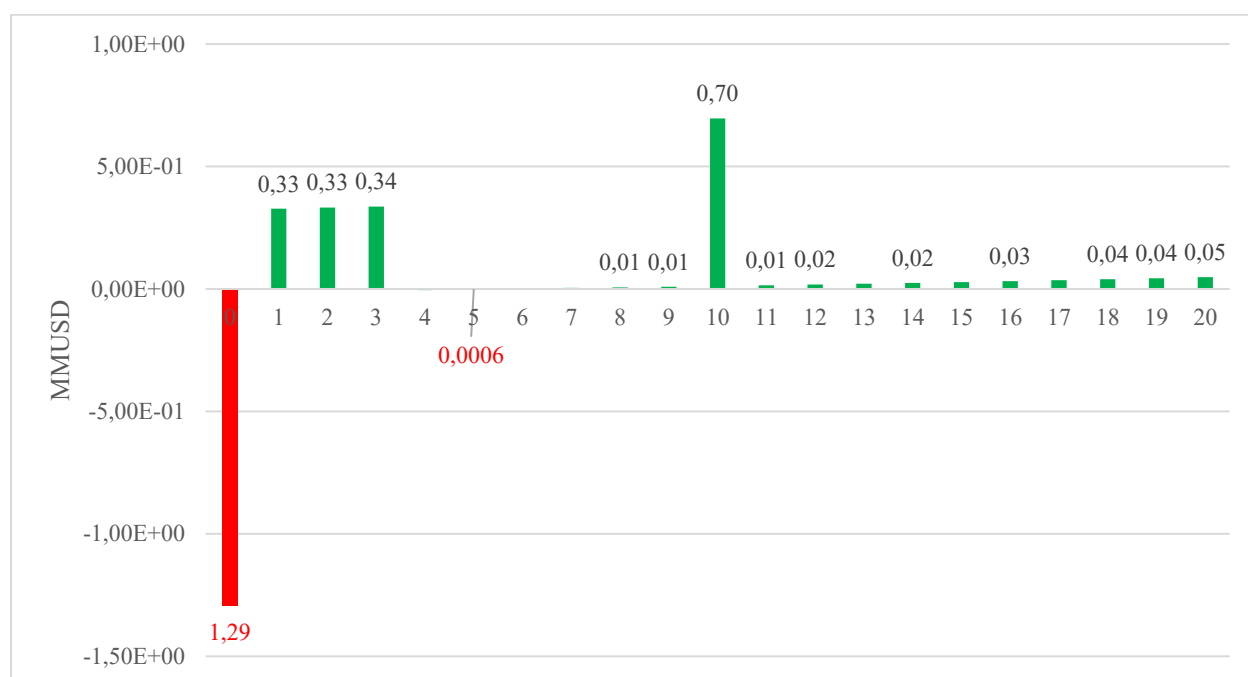
el nivel de producción crezca gradualmente de 80% a 100% en los primeros 5 años y un ahorro de \$0.42 USD/kWh que aumenta anualmente en la misma medida que la inflación.

La Figura 13 presenta el flujo de caja neto obtenido para el ahorro de \$ 43,079 USD con la aplicación de la Alternativa 1. En esta figura se visualiza un incremento en el año 10, esto se debe a que este es el tiempo de vida útil de un aire acondicionado (Hitachi Cooling & Heating) y allí se debería hacer un cambio del equipo, pero los sistemas centralizados de enfriamiento pueden llegar a durar 20 años por la vida útil de los intercambiadores y el compresor. Esto se ve representado como un ahorro acumulado de \$684,493 USD, asumiendo que en cada casa hay 5 aires acondicionados de 16 kW de Puremind Technology Co. (PMDC-09BCH) Los costos de refrigerante se tomaron en base a la venta de R134a, debido a que es el más comercial de los dos componentes del R450a, teniendo una proporción aproximada de 50%. El R1234ze es el otro componente del refrigerante, pero para este no se encontraron precios mayoristas. Este es parte del CAPEX debido a que se compra una sola vez y este se recircula, teniendo pérdidas despreciables, con un valor de \$157,295 USD.

Los indicadores financieros obtenidos con base en la Figura 13 corresponden a VPN de \$ 43,078 USD, un TIR de 7.32% , un ROI del 117% a 20 años y un *Payback* de 10 años.

Figura 13. *Flujo neto de caja*

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO



Los resultados del análisis de sensibilidad son presentados en la Tabla 12. Según esta tabla, el proyecto tiene una elevada dependencia respecto a los costos CAPEX y los costos de la energía eléctrica. Este análisis incluía escenarios de sensibilidad tanto positiva como negativa; teniendo mayor variación con respecto al CAPEX donde variaciones del del 20% en el precio de este generan un cambio de \$200,000 USD en el valor presente neto del proyecto.

Tabla 132. *Análisis de sensibilidad.*

	VPN	TIR	Payback	Diferencia VPN
Línea base WACC	\$ 43,078.74	7.32%	10	
6.5 TMAR	\$ 54,100.88	7.32%	10	25.49%
+20% CAPEX (\$1,550,899)	-\$ 152,850.73	4.29%	10	270.20%
-20% CAPEX (\$1,033,932)	\$ 261,052.22	10.76%	10	
+20% kWh (\$0.51)	\$ 198,943.58	9.27%	10	145.61%
-20% kWh (\$0.34)	-\$ 90,791.09	4.97%	10	

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Al utilizar el WACC nominal como TMAR (7%) se obtiene un VPN menor que si se empleara la TMAR que utilizan en proyectos similares en Escocia, la cual es del 6.5% (Scottish Government, 2025). Por ello es clave elegir los indicadores financieros correctos. Proyectos similares en Escocia reportan TMAR de 6.5% (Scottish Government, 2025) generando de esta manera un VPN mayor con respecto al calculado con el WACC nominal de 7%. Al elegir las condiciones del proyecto, se debe tener en cuenta esto para correctas comparaciones del retorno esperado en el proyecto.

Según la Tabla 13, el peor escenario se da al aumentar el CAPEX un 30% y disminuir el costo de la energía un 20%, con ello se obtiene un VPN de \$ -357,834 USD. El mejor escenario se encuentra al disminuir el CAPEX un 20% y la generación eléctrica aumentarla un 5%, arrojando un VPN de \$ 252,815 USD, como se muestra en la Tabla 13. Estos porcentajes se basan en el método cuantitativo del análisis de riesgo de los 3 escenarios.

Tabla 143. *Análisis de riesgo de los tres escenarios.*

		Costo Capital [MMUSD \$]	kW [MMUSD \$/año]	VPN [MMUSD \$]
% Cambio Peor Escenario		30%	-20%	-900%
Escenarios	Peor	1.68	1.18	-0.36
	Base	1.29	1.47	0.04
	Mejor	1.03	1.55	0.25
% Cambio Mejor Escenario		-20%	5%	62.5%

Respondiendo a la pregunta de investigación, el proyecto tiene viabilidad técnico-financiera. Contempla un TIR de 7.32%, frente a una TMAR 7%, un VPN \$ 43,078 USD y un *Payback* de 10 años. Se alinea con los objetivos de la empresa de cero emisiones netas de carbono

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

en 2050, apoyando el plan de descarbonización trabajado actualmente. Técnicamente, presenta una alta eficiencia con un COP de refrigeración igual a 5.698.

Con lo anterior, el desarrollo de un distrito térmico representaría una reducción de costos y contribuiría con el confort térmico, dadas las altas temperaturas que caracterizan a la ciudad de Barrancabermeja. Su construcción e instalación requeriría de mano de obra, la cual generaría empleo a la comunidad y proporcionaría un impacto económico positivo a la localidad. Además, el proyecto ayudaría a reducir la huella de carbono, donde en 2024 se reporta un factor de emisión de 0.21742 ton CO₂eq/MWh (Portal XM, 2025) generando así una mitigación estimada de 23.4 ton CO₂eq/año.

5. Conclusiones

Barrancabermeja es una ciudad con una temperatura ambiente alta, ello provoca que la gran mayoría de sus hogares gasten una considerable cantidad de energía eléctrica en sistemas de enfriamiento. Se registra un consumo de energía eléctrica promedio de 135,513,591 kW por mes entre todos los hogares estrato 5, donde aproximadamente el 45% dirigido al uso de aires acondicionados. Se definió una población de 50 casas ubicadas en el barrio el Rosario para el diseño de una bomba de calor, lo cual es igual a 30.56 MMBtu/h de energía suministrada

Mediante simulación, 2 diferentes alternativas de diseño de bombas de calor fueron evaluadas con los refrigerantes R450a y R600a, obteniendo que la Alternativa 1 con el fluido R450a (133 m³/h) presenta el mejor desempeño con un COP de 5.698.

La Alternativa de bomba de calor más adecuada fue la 1 con el refrigerante R450a, la cual consta de 4 intercambiadores de calor, 2 condensadores de 6 metros de largo y 541 tubos, donde pasan 1,610 m³/h de GLP por la carcasa, 2 evaporadores de 3 metros y 488 tubos, donde por los tubos pasan 852.7 m³/h de agua; un compresor con un delta de P de 220.6 kPa y una válvula de expansión con un delta de P de 48.26 kPa, la cual crea el efecto Joules-Thomson.

Desde un punto de vista financiero, el distrito térmico representa un ahorro de \$43,078 USD en energía eléctrica para sistemas de enfriamiento en hogares de la refinería. Es un proyecto apoyado por diversas regulaciones tributarias, disminuyendo a un más sus costos. Presenta un TIR de 7.32%, el cual es mayor al TMAR de 7%. A través del análisis de sensibilidad se obtuvo que al disminuir el CAPEX un 20% y aumentar el costo energético en 5%, se obtiene un VPN de \$252,815 USD y TIR 11.3%, demostrando la alta rentabilidad del proyecto.

6. Recomendaciones

Para aumentar el aprovechamiento del sistema, se recomienda optar por la posibilidad de emplear el condensador (la parte caliente del proceso) y capitalizarla, aumentando con ello el flujo de caja.

Evaluar como alternativas bombas de calor locales para cada caso, con ello evitar gastos operativos en contratación.

Estudiar una bomba de calor centralizada con sistemas de absorción en lugar de un flujo de compresión mecánica.

Se recomienda avanzar a la etapa de diseño de una ingeniería básica, lo cual ampliaría los requerimientos de infraestructura civil, eléctrica e instrumentación.

Referencias bibliográficas

- Alibaba.com (n.d). Gree Multi Split Air Conditioners VRF Cassette Duct Floor Ceiling Wall Mount Central Air Conditioning System 8kW-16kW Wifi.
https://www.alibaba.com/product-detail/GreeMultiSplitAirConditionersVRF_1600614121840.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.2c0213a0euz03g&priceId=b0dc454a31654eef8b36a7b37df0e3fe
- Branan, C. (1994). Rules of Thumb for Chemical Engineers. Elsevier Science.
- Carbon Trust (marzo de 2023). Análisis de la demanda de enfriamiento y de su potencial de flexibilidad en Colombia.
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Estudio_de_Demanda_de_Enfriamiento_VF.pdf
- Cero CO2 (n.d). Cálculo huella de carbono.¿Qué es la huella de carbono? Una aproximación metodológica. <https://www.ceroco2.org/soluciones-ceroco2/calculo-huella-de-carbono/que-es-la-huella-de-carbono#:~:text=Y%20el%20factor%20de%20emisi%C3%B3n,CO2%20eq%2FkWh%20consumido.>
- Comunicaciones. (2022, 18 febrero). Distritos Térmicos, la apuesta de 10 ciudades hacia la eficiencia energética -. <https://www.minambiente.gov.co/distritos-termicos-la-apuesta-de-10-ciudades-hacia-la-eficiencia-energetica/>
- CREG (2021). Resolución 215 de 2021 por la cual se modifica la tasa de retorno para la actividad de distribución de energía eléctrica, aprobada en la Resolución CREG 016 de 2018 https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0215_2021.htm

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Dang, C. Hihara E. y Ito, M. (22 de diciembre de 2014). Thermal Decomposition of Lower-GWP Refrigerants. Conferencia internacional de refrigeración y aires acondicionados Paper 1538. Purdue.

Districtos energéticos (2019). Los distritos térmicos: una apuesta a la calefacción urbana. Ministerio de ambiente. ISBN: 978-958-5551-04-6.

Duan, y., et al. (6 de agosto de 2021). Optimal schemes and benefits of recovering waste heat from data center for district heating by CO₂ transcritical heat pumps. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114591>

Desmi (n.d). Pumps for District Heating.

Euroheat & Powr. (n.d). LARGE HEAT PUMPS IN DISTRICT HEATING & COOLING SYSTEMS. <https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/content/v18-technology-report-large-heat-pumps-in-district-heating-and-cooling-systems.pdf>

Gobierno distrital de Barrancabermeja (2024). ESTUDIO TÉCNICO DE REFERENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DE COSTOS ESTIMADOS DEL SERVICIO DE ALUMBRADO PÚBLICO EN EL DISTRITO DE BARRANCABERMEJA.

Hitachi (n. d). Cuánto dura un aire acondicionado y cómo prolongar su vida útil. <https://www.hitachiaircon.com/es/noticias/como-prolongar-la-vida-util-de-tu-aire-acondicionado>

IEA (2023), Renewable Energy Market Update - June 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>,

Licence: CC BY 4.0

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

International Energy Agency. (noviembre de 2022). The Future of Heat Pumps. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/2cf6c5c5-54d5-4a17-bf8e-](https://iea.blob.core.windows.net/assets/2cf6c5c5-54d5-4a17-bf8e-8924123eebcd/TheFutureofHeatPumps.pdf)

[8924123eebcd/TheFutureofHeatPumps.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/2cf6c5c5-54d5-4a17-bf8e-8924123eebcd/TheFutureofHeatPumps.pdf)

Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. 13 de mayo de 2014. D.O. No. 49150.

Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. 10 de julio de 2021. D.O. No. 51731.

Ley 2101 de 2021. Por medio de la cual se reduce la jornada laboral semanal de manera gradual, sin disminuir el salario de los trabajadores y se dictan otras disposiciones. 15 de julio de 2021. D.O. No. 51736.

Ley 2169 de 2021. Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 2021. D.O. No. 51896.

Lund, H., et al. (2024). Renewable energy and waste heat recovery in district heating systems in China: A systematic review. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130788>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020). Guía metodológica: Distritos Térmicos. Colombia. ISBN electrónico: 978-958-5551-20-6

ObservadoresCol, Data & Analytics. (9 de marzo de 2024). Información y conclusiones para cumbre energética del Caribe Colombiano. <https://observadorescol.org/wp-content/uploads/ObservadoresCol-Informe-Energetico-Colombiano-Marzo-5-2024.pdf>

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Peters, M. S. & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw Hill, New York.

Rednova (25 de septiembre de 2018). FICHA TÉCNICA Y HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL GLP. <https://rednova.com.co/wp-content/uploads/2018/11/F0175-Ficha-tecnica-y-hoja-de-datos-de-seguridad-del-GLP.pdf>

Resolución 634 de 2022 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo] . Por la cual en desarrollo del Protocolo de Montreal, se entiende prohibida la fabricación e importación de equipos y productos que contengan y/o requieran para su operación o funcionamiento las sustancias controladas en los Anexos A, B, C, E y F del Protocolo de Montreal y se adoptan otras disposiciones. 17 de junio de 2022.

Resolución 2254 de 2017 [Ministerio del Medio Ambiente]. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. 1 de noviembre de 2017.

(Resultado preliminar del cálculo de Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional 2024, para inventario de Gases de Efecto Invernadero, s/f)
Resultado preliminar del cálculo de Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional 2024, para inventario de Gases de Efecto Invernadero. (s/f). Portal XM. Recuperado el 3 de octubre de 2025, de <https://www.xm.com.co/noticias/7493-resultado-preliminar-del-calculo-de-factor-de-emision-del-sistema-interconectado>

Rincón, V. (22 de mayo de 2025). El precio del gas en Colombia aumentó más del 70% en los últimos 6 años. *Periódico UNAL*. <https://periodico.unal.edu.co/articulos/el-precio-del-gas-en-colombia-aumento-mas-del-70-en-los-ultimos-6-anos>

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

- Salcedo, J. G. (5 de marzo de 2019). Distrito térmico La Alpujarra, pionero en América Latina - Distrito energetico. Distrito Energetico. <https://www.distritoenergetico.com/distrito-termico-la-alpujarra-pionero-en-america-latina/>
- Sayegh, M. A., Jadwiszczak, P., Axcell, B. P., Niemierka, E., Bryś, K., & Jouhara, H. (2018). Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy and Buildings*, 166, 122–144. doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.006
- Scottish Government (17 de enero de 2025). Heat network projects: quarterly report – January 2025. ISBN: 9781836911838
- Sun, k. et al. (28 de agosto de 2019). Key issues and novel optimization approaches of industrial waste heat recovery in district heating systems. elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116005>
- planete energies (1 de agosto de 2015). District Heating Systems: Uneven Use Around the World. <https://www.planete-energies.com/en/media/article/district-heating-systems-uneven-use-around-world>
- Taylor and Francis Group (2016). District cooling: Theory and practice. CRC Press. ISBN 9781498705509
- Gobierno distrital (2024). Estudio técnico para la determinación de costos estimados del servicio de alumbrado público en el distrito de Barrancabermeja. <https://www.barrancabermeja.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=visorpdf&file=https%3A%2F%2Fwww.barrancabermeja.gov.co%2Floader.php%3FlServicio%3DTools2%26lTipo%3Ddescargas%26lFuncion%3DexposeDocument%26idFile%3D159617%26tmp%3Dd0a70c0070ff67064a5ae40633b66471%26urlDeleteFunction%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.barrancabermeja.gov.co%252Floader.php%253Fl>

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Servicio%253DTools2%2526lTipo%253Ddescargas%2526lFuncion%253DdeleteTemporalFile%2526tmp%253Dd0a70c0070ff67064a5ae40633b66471&pdf=1&tmp=d0a70c0070ff67064a5ae40633b66471&fileItem=159617

(S/f). Banpunext.co.th. Recuperado el 24 de septiembre de 2025, de <https://www.banpunext.co.th/district-cooling-system-revolutionizing-ac-with-eco-friendly-innovation>

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Apéndices

Apéndice A Especificaciones de los equipos

En las tablas 14 y 15 se muestran las especificaciones de los equipos empleados en la simulación en la herramienta Aspen Hysys.

Tabla 14. Especificaciones condensador.

1	Company:														
2	Location:														
3	Service of Unit: Condensador														
4	Tag: E-100 A/B														
5															
6	Size :	700 - 6000	mm	Type:	BEM	Horizontal	Connected in:	2 parallel	1 series						
7	Surf/unit(eff.)	382.6	m ²	Shells/unit	2		Surf/shell(eff.)	191.3	m ²						
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT														
9	Fluid allocation					Shell Side		Tube Side							
10	Fluid name					HCB in->HCB out		2->3							
11	Fluid quantity, Total	kg/s				3341.448		23.2736							
12	Vapor (In/Out)	kg/s				0	365,5516	23.2736	0						
13	Liquid	kg/s				3341,448	2975,896	0	23.2736						
14	Noncondensable	kg/s				0	0	0	0						
15															
16	Temperature (In/Out)	°C				-7.68	-22.49	78.16	-7.31						
17	Bubble / Dew point	°C				-7.68 / 25.06	-46.24 / -3.61	6.29 / 6.29	5.17 / 5.17						
18	Density Vapor/Liquid	kg/m ³				/ 582.26	2.07 / 599.06	12.48 /	/ 1334.38						
19	Viscosity	mPa-s				/ 0.1825	0.0086 / 0.2123	0.0134 /	/ 0.2872						
20	Molecular wt, Vap					45.02		108.6							
21	Molecular wt, NC														
22	Specific heat	kJ/(kg-K)				/ 2.275	1.706 / 2.172	0.556 /	/ 0.719						
23	Thermal conductivity	W/(m-K)				/ 0.108	0.0195 / 0.1142	0.0138 /	/ 0.0628						
24	Latent heat	kJ/kg				371.1	380.6	187	187.9						
25	Pressure (abs)	bar				3.44738	1.37895	3.21985	3.09394						
26	Velocity (Mean/Max)	m/s				258.01 / 537.12		10.51 / 20.83							
27	Pressure drop, allow./calc.	bar				0.68948	198.97	1.03421	0.12591						
28	Fouling resistance (min)	m ² -K/W				0		0	0	Ao based					
29	Heat exchanged	5315.1	kW				MTD (corrected)		16.4	°C					
30	Transfer rate, Service	846.8	Dirty				1140.8	Clean		1140.8 W/(m ² -K)					
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								Sketch						
32					Shell Side		Tube Side								
33	Design/Vacuum/test pressure:g	bar		4 / / /	4 / / /										
34	Design temperature / MDMT	°C		35 / / /	115 / / /										
35	Number passes per shell	1		2											
36	Corrosion allowance	mm		3.18											
37	Connections	In	mm		1 387.35 / -	1 336.55 / -									
38	Size/Rating	Out	mm		1 387.35 / -	1 102.26 / -									
39	ID	Intermediate		/ -											
40	Tube #:	541	OD:	19.05	Tks. Average	2.11	mm	Length:	6000	mm	Pitch:	23.81	mm	Tube pattern:	30
41	Tube type:	Plain		Insert:None		Fin#:		#/m		Material:Carbon Steel					
42	Shell	Carbon Steel		ID	700	OD	720	mm	Shell cover	-					

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

43	Channel or bonnet	Carbon Steel			Channel cover	-
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel	-		Tubesheet-floating	-
45	Floating head cover	-			Impingement protection	None
46	Baffle-cross	Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)	41.39
					Hori Spacing: c/c	585
47	Baffle-long	-	Seal Type			Inlet
						614.47
48	Supports-tube	U-bend	0		Type	
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(UW-20 "I)
50	Expansion joint	-		Type	None	
51	RhoV2-Inlet nozzle	345224		Bundle entrance	855336	Bundle exit
						27113110
52	Gaskets - Shell side	-		Tube side		Flat Metal Jacket Fibe
53	Floating head	-				
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class	R - refinery service	
55	Weight/Shell	4944,5	Filled with water	7284	Bundle	3246.9
						kg
56	Remarks					
57						
58						

Tabla 15. Especificaciones evaporador.

1	Company:						
2	Location:						
3	Service of Unit: Evaporador						
4	Tag: E-101 A/B						
5							
6	Size :	650 /1299	-3000	mm	Type:	AKT	Horizontal
						Connected in:	2 parallel
							1 series
7	Surf/unit(eff.)	82,2	m ²	Shells/unit	1	Surf/shell(eff.)	82,2
							m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT						
9	Fluid allocation				Shell Side		Tube Side
10	Fluid name				4->1		Water in->Water Out
11	Fluid quantity, Total				kg/s	21,8658	113,3736
12	Vapor (In/Out)				kg/s	0,5104	20,1799
13	Liquid				kg/s	21,3554	1,686
14	Noncondensable				kg/s	0	0
15							
16	Temperature (In/Out)				°C	-10,84	-12
17	Bubble / Dew point				°C	/	/
18	Density Vapor/Liquid				kg/m ³	9,65 / 1324,05	9,17 / 1327,77
19	Viscosity				mPa-s	0,0098 / 0,2948	0,0098 / 0,2966
20	Molecular wt, Vap					102,03	102,03
21	Molecular wt, NC						
22	Specific heat				kJ/(kg-K)	0,794 / 1,324	0,792 / 1,318
23	Thermal conductivity				W/(m-K)	0,0104 / 0,1027	0,0103 / 0,1032
24	Latent heat				kJ/kg	209,9	210,7
25	Pressure (abs)				bar	1,94028	1,85006
26	Velocity (Mean/Max)				m/s	5,53 / 10,66	2,65 / 2,81
27	Pressure drop, allow./calc.				bar	0,34474	0,09022
28	Fouling resistance (min)				m ² -K/W	0	0
							Ao based
29	Heat exchanged	4110,4			kW		MTD (corrected)
							18,75
30	Transfer rate, Service	2684,8			Dirty	2684,8	Clean
							2684,8
							W/(m ² -K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL						Sketch
32					Shell Side		Tube Side
33	Design/Vacuum/test pressure:g	bar	3	/	/	3	/

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

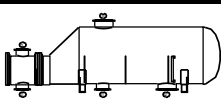
34	Design temperature / MDMT	°C	35	/	50	/				
35	Number passes per shell		1		2					
36	Corrosion allowance	mm	3,18		3,18					
37	Connections	In	mm	1	254,51	/			-	
38	Size/Rating	Out	1	387,35	/	-			1	
39	ID	Out - Vapor	1	387,35	/	-	/			
40	Tube #: 488	OD: 19,05	Tks. Average 2,11	mm	Length: 3000	mm	Pitch: 23,81	mm	Tube pattern:30	
41	Tube type: Plain	Insert:None	Fin#:	#/m	Material:Carbon Steel					
42	Shell Carbon Steel	ID 650	OD 670	mm	Shell cover	Carbon Steel				
43	Channel or bonnet	Carbon Steel				Channel cover	Carbon Steel			
44	Tubesheet-stationary	Carbon Steel				Tubesheet-floating	Carbon Steel			
45	Floating head cover	Carbon Steel				Impingement protection	None			
46	Baffle-cross	Carbon Steel		Type	Unbaffled		Cut(%d)	Spacing: c/c	mm	
47	Baffle-long	-				Seal Type	Inlet			
48	Supports-tube	U-bend	0		Type					
49	Bypass seal	-			Tube-tubesheet joint	Expanded only (2 grooves)(UW-20 "i")				
50	Expansion joint	-				Type	None			
51	RhoV2-Inlet nozzle	585	Bundle entrance	112	Bundle exit	3263	kg/(m-s ²)			
52	Gaskets - Shell side	Flat Metal Jacket Fibe		Tube side	Flat Metal Jacket Fibe					
53	Floating head	Flat Metal Jacket Fibe								
54	Code requirements	ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class	R - refinery service				
55	Weight/Shell	5194,3	Filled with water	10348,6	Bundle	1844,3	kg			
56	Remarks									
57										
58										

Tabla 16. Especificaciones válvulas de seguridad.

TAG	V1E100A	V1E100B	V1E101A	V1E101B
Escenario	Expansión térmica	Expansión termica	Expansión térmica	Expansión térmica
Fluido	R450a	R450a	Agua	Agua
Conv, balanc o piloteada	Piloteada	Piloteada	Convencional	Convencional
Op Temp/ Relv. Temp [°C]	-7.354 / 22.25	-7.354 / 22.25	12 / 146.3	12 / 146.3
Op Press/Set Press [barg]	2.081 / 4	2.081 / 4	0.623 / 3	0.623 / 3
Flujo relevado [kg/h]	3814	3814	61.17	61.17
Orificio calc [cm²]	2.097	2.097	8.42E-02	8.42E-02
Orificio selecc [cm2]	3.245 (G)	3.245 (G)	0.0709 (D)	0.0709 (D)

Apéndice B. Evaluación financiera

En la Tabla 17 desglosa el costo de mano de obra anualmente, teniendo en cuenta todas las prestaciones de ley y los 7 trabajadores requeridos.

EVALUACIÓN DE UN DISTRITO TÉRMICO

Tabla 17. *Anualidad por mano de obra.*

Salario	\$ 2,135,250.0
Auxilio de transporte	\$ 200,000.0
Salud (8,5%)	\$ 181,496.25
Pensión (12%)	\$ 256,230.0
ARL NIVEL IV (4,35 %)	\$ 92,883.38
Prima	\$ 194,604.7
Cesantías	\$ 194,604.17
Intereses a las cesantías	\$ 1,946.04
Parafiscales	\$ 192,172.50
Vacaciones	\$ 81,900.0
Total mensual por trabajador	\$ 3,531,086.50
Total mensual	\$ 24,717,605.50
TOTAL ANUAL	\$ 296,611,266.00

La Tabla 18 muestra los costos de producción empleados en el análisis financiero y la Tabla

19 desglosa los costos de producción. Todo esto teniendo en cuenta lo siguiente:

- Horizonte del proyecto → 20
- TMAR → 7%
- Impuesto de renta → 33%
- Inflación → 5%

Tabla 18. Costos de operación (USD).

PERIODOS →	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
COSTOS DE FABRICACION	0	291.715	291.715	291.715	54.642	55.561	56.044	56.551	57.083	57.641	58.228	58.844	59.491	60.170	60.883	61.632	62.418	63.244	64.110	65.021	65.976
COSTO DIRECTO	0	45.126	45.126	45.126	47.506	48.426	48.908	49.415	49.947	50.506	51.093	51.709	52.356	53.035	53.748	54.497	55.283	56.108	56.975	57.885	58.841
MATERIA PRIMA	0	6.353	6.353	6.353	8.734	9.653	10.136	10.643	11.175	11.734	12.320	12.936	13.583	14.262	14.975	15.724	16.510	17.336	18.203	19.113	20.068
DOTACIÓN	0	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772	38.772
GASTOS INDIRECTOS	0	336.840	336.840	336.840	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135
MANTENIMIENTO	0	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135	7.135
GASTOS VARIOS	0	343.976	343.976	343.976	0	0	0	0	0	0	0										
GASTOS ADMINISTRATIVOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	684.493	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUELDOS & PARAFISCALES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	684.493	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL COSTO OPERACION	0	291.715	291.715	291.715	54.642	55.561	56.044	56.551	57.083	57.641	626.265	58.844	59.491	60.170	60.883	61.632	62.418	63.244	64.110	65.021	65.976

Tabla 19. Ingresos de producción (USD).

PERIODOS →	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
INGRESOS POR VENTAS	0	36.202	40.388	44.902	49.766	55.004	57.755	60.642	63.674	66.858	70.201	73.711	77.397	81.266	85.330	89.596	94.076	98.780	103.719	108.905	114.350
COSTO TOTAL	0	291.715	291.715	291.715	54.642	55.561	56.044	56.551	57.083	57.641	626.265	58.844	59.491	60.170	60.883	61.632	62.418	63.244	64.110	65.021	65.976
UTILIDADES BRUTAS ANTES DE IMPUESTOS	0	327.916	332.102	336.616	4.876	557	1.711	4.092	6.592	9.217	696.466	14.867	17.906	21.096	24.447	27.964	31.658	35.536	39.608	43.884	48.374
UTILIDADES DESPUES DE IMPUESTOS	0	327.916	332.102	336.616	4.876	557	1.711	4.092	6.592	9.217	696.466	14.867	17.906	21.096	24.447	27.964	31.658	35.536	39.608	43.884	48.374
RESERVA LEGAL (10%)	0	32.792	33.210	33.662	0	0	171	409	659	922	69.647	1.487	1.791	2.110	2.445	2.796	3.166	3.554	3.961	4.388	4.837
UTILIDAD POR DISTRIBUIR	0	295.125	298.892	302.954	4.876	557	1.540	3.683	5.933	8.295	626.819	13.380	16.115	18.987	22.002	25.168	28.492	31.983	35.648	39.496	43.536
+ RESERVA LEGAL	0	32.792	33.210	33.662	0	0	171	409	659	922	69.647	1.487	1.791	2.110	2.445	2.796	3.166	3.554	3.961	4.388	4.837
FLUJO DE PRODUCCION	0	327.916	332.102	336.616	4.876	557	1.711	4.092	6.592	9.217	696.466	14.867	17.906	21.096	24.447	27.964	31.658	35.536	39.608	43.884	48.374