

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Diseño de una bomba de calor para el aprovechamiento energético en una industria del bocadillo
en la provincia de Vélez, Santander.

María Alejandra Nítola Cardozo y Sara Viviana Suárez Solano

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Tabla de Contenido

Introducción.....	7
1.Objetivos	8
1.1.Objetivo General.....	8
1.2.Objetivos Específicos.....	8
2.Marco conceptual.....	8
3.Estado del arte.....	10
4 Metodología	12
5.Resultados	13
5.1.Análisis del proceso seleccionado.....	13
5.2.Diseño de una Bomba de Calor.....	22
5.2.1.Alternativa 1	22
5.2.2.Alternativa 2	27
5.2.3.Alternativas de Diseño de la Bomba de Calor Seleccionada	31
5.2.4.Escenarios Críticos y Acciones Preventivas en la Bomba de Calor	35
5.2.5.Configuración del Plant Plot, Layout y vista isométrica de la Alternativa escogida	35
5.3.Evaluación de la Alternativa escogida con diferentes fluidos de trabajo.....	40
6.Conclusiones	42
7.Recomendaciones	44
Referencias Bibliográficas.....	45
Apéndice.....	48

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Lista de Tablas

Tabla 1	Tabla de corrientes	17
Tabla 2	Corrientes del sistema de bomba de calor -Alternativa 1	25
Tabla 3	Parámetros de diseño Bomba de calor- Alternativa 1	27
Tabla 4	Corrientes del sistema de bomba de calor -Alternativa 2	29
Tabla 5	Parámetros de diseño Bomba de calor- Alternativa 2.....	31
Tabla 6	Comparación del Potencial Económico (PE ₂) bajo diferentes alternativas de operación	32
Tabla 7	Gastos de Capital (CAPEX) por Equipos y Gastos de Operación (OPEX)	32
Tabla 8	Análisis de costos, producción y rentabilidad por alternativa.....	33
Tabla 9	Escenarios de falla, consecuencias y acciones preventivas en la bomba de calor	35
Tabla 10	Requerimientos de tuberías y accesorios	36
Tabla 11	Rendimiento global del ciclo de la bomba de calor según el refrigerante	41
Tabla 12	Calor transferido por Operación unitaria	54
Tabla 13	Costos unitarios de insumos, producto y subproductos– El Horizonte S.A.S	54
Tabla 14	Balance económico de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo-EL HORIZONTE S.A.S.	56
Tabla 15	Tabla de Corrientes Alternativa 1	60
Tabla 16	Balance económico de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo, Alternativa 1-EL HORIZONTE S.A.S.	62
Tabla 17	Tabla de Corrientes Alternativa 2	65
Tabla 18	Balance económico de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo, Alternativa 2-EL HORIZONTE S.A.S.	67
Tabla 19	Corrección factor de instalación	69
Tabla 20	Factor costo de un material	70
Tabla 21	Calculo gastos de Capital (CAPEX) para Equipos por Alternativa.....	70
Tabla 22	Propiedades termodinámicas de refrigerantes.....	73
Tabla 23	Heurística para la distribución de los equipos.....	74

Lista de Figuras

Figura 1	Ciclo de una Bomba de Calor convencional.	9
Figura 2	Descripción de la metodología.	13
Figura 3	Diagrama de Entradas y Salidas (E/S) del proceso de producción de Bocadillo – El Horizonte S.A.S.	16
Figura 4	Diagrama de flujo en bloques (BFD, Block Flow Diagram) del proceso de producción de Bocadillo – El Horizonte S.A.S.	19
Figura 5	Documentación fotográfica del proceso productivo de bocadillo – El Horizonte S.A.S.	20
Figura 6	Diagrama de flujo de proceso (PFD, Process Flow Diagram) del proceso de producción de Bocadillo – El Horizonte S.A.S.	21
Figura 7	Perfil energético térmico por operación unitaria de la planta de producción de Bocadillo – El Horizonte S.A.S.	22
Figura 8	PFD – Alternativa 1: Diseño del sistema de bomba de calor	23
Figura 9	Efecto de la Diferencia de Presión y la Fracción de Vapor sobre el COP del Sistema	24
Figura 10	Diagrama Presión-Entalpía del R718 (Agua) con Representación del Ciclo de la HP- Alternativa 1.	26
Figura 11	PFD – Alternativa 2: Diseño del sistema de bomba de calor	28
Figura 12	Diagrama Presión-Entalpía del R718 (Agua) con Representación del Ciclo de la HP- Alternativa 2.	30
Figura 13	Diagrama de flujo del proceso con integración de bomba de calor – El Horizonte S.A.S.	34
Figura 14	Plot Plan de la Planta de Producción (Alternativa 2)– El Horizonte S.A.S.	37
Figura 15	Layout de la Planta de Producción (Alternativa 2) – El Horizonte S.A.S.	38
Figura 16	Vista isométrica Bomba de Calor (Alternativa 2) – El Horizonte S.A.S.	39
Figura 17	Diagrama de Entradas y Salidas (E/S) del proceso de producción de Bocadillo, Alternativa 1– El Horizonte S.A.S.	57
Figura 18	Diagrama de flujo del proceso con integración de bomba de calor Alternativa 1– El Horizonte S.A.S.	59
Figura 19	Diagrama de Entradas y Salidas (E/S) del proceso de producción de Bocadillo, Alternativa 2– El Horizonte S.A.S.	64

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Resumen

Título: Diseño de una bomba de calor para el aprovechamiento energético en una industria del bocadillo en la provincia de Vélez, Santander.*

Autor: María Alejandra Nítola Cardozo, Sara Viviana Suárez Solano **

Palabras Clave: Bomba de calor, energía residual, sostenibilidad, emisiones, bocadillo

Descripción: Colombia, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París, se comprometió a reducir en un 20% sus emisiones de GEI para 2030. El sector de alimentos es altamente demandante en energía y emisor de GEI. En la provincia de Vélez, Santander, la producción de bocadillo generó 59,5 Gg CO₂eq en 2015, lo que evidencia su impacto ambiental. En este contexto, el proyecto se planteó diseñar una bomba de calor para aprovechar energéticamente los flujos residuales de una industria de bocadillo en Vélez, dando respuesta a la pregunta de investigación.

La metodología constó de tres etapas. Primero, se recopilaron datos operativos mediante balances de masa y energía, BFD y PFD, para caracterizar los flujos de calor residual y construir un perfil energético. En la segunda etapa, se desarrolló y simuló una bomba de calor estándar adaptada a las condiciones de la planta bajo dos alternativas, evaluando su viabilidad técnica y representando la opción seleccionada en diagramas Layout, Plot plan y vista isométrica. Finalmente, se analizó el desempeño de la bomba con diferentes fluidos de trabajo considerando propiedades termodinámicas, costos y sostenibilidad.

El análisis del proceso en El Horizonte S.A.S. permitió cuantificar entradas y salidas, obteniendo una producción de 1.709,57 kg/lote en 2,5 horas, equivalente a 3 lotes diarios y 1.617 toneladas anuales. Los balances de energía mostraron que la caldera es el mayor consumidor (2.973.480 kJ/lote), con pérdidas del 55 % en la distribución de vapor, evidenciando la necesidad de recuperar calor residual del escaldado y caldera. Se diseñaron y simuló dos alternativas de bomba de calor, obteniéndose COP de 4,56 y 4,18, con producciones proyectadas de 782.888 y 1.507.840 kg/año. La evaluación económica (PE2, CAPEX y OPEX) indicó que la alternativa 2 es la más favorable por su menor costo operativo y mejor relación inversión-beneficio.

Finalmente, la evaluación de refrigerantes descartó los halogenados por su alto GWP y ODP, destacándose el agua (R-718) como opción óptima por su COP de 4,19, bajo costo, mínima masa requerida y nulo impacto ambiental.

*Trabajo de Grado

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

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Abstract

Title: Design of a Heat Pump for Energy Recovery in a Guava Paste Industry in the Province of Vélez, Santander. *

Author: María Alejandra Nítola Cardozo, Sara Viviana Suárez Solano **

Key Words: Heat pump, residual energy, sustainability, emissions, bocadillo

Description: Colombia, aligned with the Sustainable Development Goals and the Paris Agreement, committed to reducing its greenhouse gas (GHG) emissions by 20% by 2030. The food sector is highly energy-demanding and a significant emitter of GHGs. In the province of Vélez, Santander, guava paste production generated 59.5 Gg CO₂eq in 2015, demonstrating its environmental impact. In this context, the project aimed to design a heat pump to recover energy from residual heat flows in a guava paste industry in Vélez, addressing the research question.

The methodology consisted of three stages. First, operational data were collected through mass and energy balances, BFDs, and PFDs to characterize residual heat flows and develop an energy profile. In the second stage, a standard heat pump adapted to the plant's conditions was developed and simulated under two alternatives, assessing its technical feasibility and representing the selected option in Layout, Plot Plan, and isometric diagrams. Finally, the pump's performance was analyzed with different working fluids, considering thermodynamic properties, costs, and sustainability.

Process analysis at El Horizonte S.A.S. allowed for quantifying inputs and outputs, obtaining a production of 1,709.57 kg per batch in 2.5 hours, equivalent to 3 daily batches and 1,617 annual tons. Energy balances showed that the boiler is the main consumer (2,973,480 kJ/batch), with heat losses of up to 55% during steam distribution, highlighting the need to recover residual heat from the scalding process and boiler. Two heat pump alternatives were designed and simulated, yielding heating COPs of 4.56 and 4.18, with projected productions of 782,888 and 1,507,840 kg/year. The economic evaluation (PE2, CAPEX, and OPEX) indicated that Alternative 2 is the most favorable due to its lower operating cost and better investment-benefit ratio.

Finally, the refrigerant evaluation discarded halogenated fluids due to their high GWP and ODP, while water (R-718) emerged as the optimal working fluid for its COP of 4.19, low cost, minimal mass requirement, and zero environmental impact.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Giovanni Morales Medina, Ph.D. in Chemical Engineering.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Introducción

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecen un marco global para proteger el medio ambiente y promover el bienestar (Unidas, s.f.). En términos ambientales, Colombia se comprometió con el Acuerdo de París a disminuir en un 20% sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2030, tomando como referencia el año 2015 (García Arbeláez , et al., 2016). El sector industrial de los alimentos consumió el 4% de la energía nacional para la generación de calor indirecto, emitiendo 12.083 Gg CO₂eq anuales (IDEAM, 2022); a nivel global, la cadena productiva de alimentos representa el 26% de las emisiones de CO₂eq (ECODES, 2020). Un ejemplo de este escenario a nivel regional es la producción de bocadillo en la provincia de Vélez, Santander, producción que emitió *ca* 59,5 Gg CO₂eq (360, s.f.) para una fabricación de 25 kt de bocadillo en 2015 (Valencia , 2015). Este elevado consumo térmico genera diferentes corrientes energéticas que son desaprovechadas al ser emitidas al ambiente. Esto abre una oportunidad para la implementación de bombas de calor (HP, Heat Pump), capaces de recuperar la energía de flujos residuales, por medio de un refrigerante y reutilizar la energía recuperada para cubrir parte de la demanda térmica industrial, contribuyendo así a la reducción de emisiones de GEI en la industria de los alimentos.

En términos generales, las bombas de calor corresponden a un ciclo termodinámico con un fluido de trabajo (refrigerante) que recoge calor de una fuente aprovechable y adiciona trabajo para incrementar la cantidad de energía emitida a un flujo de proceso (Sarmiento, 2020). Las HPs han sido aplicadas en diversas industrias, como la de papel, alimentos y bebidas, química, automotriz, metalurgia, textiles, plásticos, entre otras. Con estas aplicaciones es posible reducir el consumo de servicios industriales y contribuir con la transición energética (Kelly, s.f.), (Dumont , et al., s.f.)

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Por lo anterior, se propone evaluar la contribución en la reducción de GEI y el avance de prácticas energéticas sostenibles en Colombia, por medio del diseño de una HP para el aprovechamiento energético en una industria de bocadillo en Vélez, Santander. La pregunta de investigación corresponde a ¿Cuál diseño de bomba de calor se ajusta a las condiciones operativas particulares de la industria del bocadillo seleccionada, conduciendo a un aprovechamiento de la energía térmica residual?

1. Objetivos

1.1.Objetivo General

Diseñar una bomba de calor para el aprovechamiento energético de flujos residuales en una industria del bocadillo en la provincia de Vélez, Santander.

1.2.Objetivos Específicos

- Analizar el proceso y los esquemas de operación de una industria del bocadillo, por medio de los diagramas de flujo de bloques (BFD), los datos de operación y los balances de masa y energía, caracterizando los flujos de calor residuales y los requerimientos energéticos del sistema.
- Desarrollar una simulación de una bomba de calor convencional, por medio de los flujos de calor caracterizados y los requerimientos energéticos del sistema, definiendo la viabilidad técnica del proceso y las condiciones operacionales.
- Evaluar el desempeño de la bomba de calor con diferentes fluidos de trabajo mediante la aplicación de la simulación, analizando las mejores condiciones operativas y el potencial económico.

2. Marco conceptual

La HP es una máquina térmica basada en un ciclo de refrigeración clásico, compuesto por un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador. Su función es elevar la

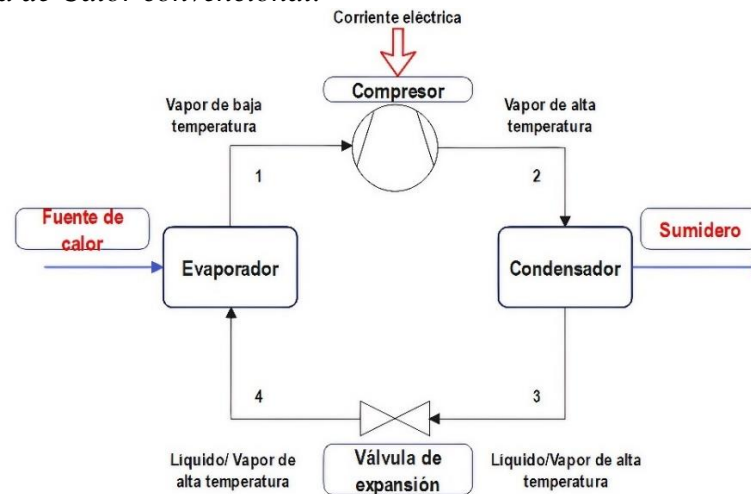
DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

temperatura de un fluido, transfiriendo energía en forma de calor desde un foco de menor temperatura hacia otro de mayor temperatura, según las necesidades del proceso (Cengel, 2009).

Las HPs más comunes o convencionales funcionan por sistemas de compresión de vapor de un refrigerante. La Figura 1 ilustra el ciclo de una bomba de calor convencional con sus componentes principales.

Figura 1

Ciclo de una Bomba de Calor convencional.



Nota. Elaboración propia mediante Wondershare EdrawMax

En la Figura 1, el refrigerante en estado líquido (corriente 4) empieza su ciclo en el evaporador, en donde se evapora por la absorción de calor de la fuente de calor a aprovechar. El refrigerante evaporado (corriente 1) pasa al compresor en donde alcanza una temperatura y presión de sobrecalentamiento (dependiendo de la potencia impartida); luego, el vapor sobrecalentado (corriente 2) es enviado al condensador en donde cede su energía a un fluido para su aprovechamiento térmico. El refrigerante parcialmente condensado y alta temperatura (corriente 3) pasa por la válvula de expansión y retorna al evaporador para completar el ciclo (Camposeco A et, 2021).

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Los refrigerantes usados en la HP se dividen en halogenados, orgánicos e inorgánicos. Los halogenados incluyen clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), hidrofluorocarbonos (HFO), hidrofluoroolefinas (HFO). Los orgánicos, también conocidos como Hidrocarbonos (HC), mientras que los inorgánicos comprenden del dióxido de carbono (CO₂, R-744), el agua (R-718) y amoníaco (R-717). La elección del refrigerante adecuado depende de la eficiencia térmica, la compatibilidad ambiental considerando el potencial de calentamiento global (GWP) y el potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y la seguridad, eficiencia y disponibilidad del refrigerante (NAMA Facility, 2020).

El desempeño de las HPs es medido mediante el coeficiente de desempeño de calentamiento (COP_{HP}, *coefficient of performance of heat pump*) considerando la energía captada por la bomba de calor de la fuente (Q_L), la energía útil liberada en el condensador (Q_H) y el trabajo real hecho por el compresor (W_{neto}).

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto}}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \quad (\text{Ec. 1})$$

3. Estado del arte

Kondou et al.,2014, evaluaron el uso de HP con refrigerantes de bajo GWP para la recuperación de calor en el proceso de pasteurización, analizando los refrigerantes R717, R365mfc, R1234ze(E) y R1234ze(Z), con cuatro configuraciones de ciclo para elevar la temperatura del agua presurizada a 160 °C, partiendo de una fuente de calor residual a 80 °C. Calcularon el COP y la eficiencia energética primaria de cada ciclo, considerando la condensación y las propiedades de los refrigerantes en términos de su Potencial de Calentamiento Global (GWP), Potencial de Destrucción del Ozono (ODP) y clasificación de grupo de seguridad (SG). El refrigerante R1234ze(Z) mostró el mejor rendimiento en ciclos de extracción múltiple, reduciendo

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

pérdidas de exergía y por estrangulación, obteniendo $COP > 1.3$. Los resultados de Kondou et al ofrecen una guía para la selección de refrigerantes R717, R365mfc, R1234ze(E) y R1234ze (Z) en aplicaciones industriales.

Arpagaus et al., 2016, evaluaron experimentalmente una HP de una sola etapa con compresor de pistón e intercambiador de calor interno. Utilizaron los refrigerantes R1336mzz(Z) y R1233zd(E) para medir el rendimiento de elevación de temperatura de 30, 50 y 70 K, empleando fuentes de calor entre 40 y 80°C, y generando temperaturas de salida esperadas entre 80 y 150°C. Según los autores, el R1233zd(E) alcanzó un COP igual a 2.8 en un ciclo básico y de 3.1 con integración de calor. Por su parte, R1336mzz(Z) obtuvo un COP de 2.4 y 4.0, respectivamente, representando un aumento del 24%. Los autores concluyen que los resultados obtenidos respaldan la viabilidad de los refrigerantes R1336mzz(E) y R1233zd(E), para su uso en sistemas de HP. Los resultados obtenidos por estos autores ofrecen una guía para la selección de refrigerantes en esta aplicación.

Wemmers et al., 2017, diseñaron una HP con compresión a escala piloto para el proceso de producción de papel en la planta SmurfitKappa. Utilizaron Butano como refrigerante y una fuente de calor residual a 60°C. Los autores consideraron la eficiencia del refrigerante mediante diagramas de entropía-temperatura del Butano, evaluando parámetros de entrada como temperatura, calor sensible, calor latente y disponibilidad de la fuente de calor. También analizaron la capacidad y el CAPEX de la HP. Según Wemmers et al, los resultados mostraron que la HP es capaz de generar vapor de hasta 2.4 barg, con diferencias de temperatura en los intercambiadores de calor menores a 5K y con un COP de 2. El trabajo de estos autores permite evaluar la viabilidad del refrigerante Butano en este tipo de aplicaciones, proporcionando una guía metodológica para

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

la ejecución de balances de energía, por lo que es posible explorar esta metodología con diferentes fluidos de refrigeración.

En síntesis, la literatura muestra que el desempeño de las bombas de calor varía según el refrigerante y la configuración del ciclo; sin embargo, diversos autores coinciden en que, para aplicaciones industriales, un COP en el rango de 3 a 5 es el criterio mínimo para considerar técnicamente viable la operación.

4. Metodología

La metodología planteada para el proyecto se estructura en tres etapas principales (ver Figura 2).

En la primera etapa, se realizó el análisis del proceso productivo y de los esquemas operativos de la industria del bocadillo en la provincia de Vélez, Santander. Para ello, se recopilaron los datos operativos de la planta mediante la elaboración de balances de masa y energía, así como de los diagramas de flujo en bloques (BFD, *Block Flow Diagram*) y diagramas de flujo de proceso (PFD, *Process Flow Diagram*). Posteriormente, se evaluaron estos resultados con el fin de caracterizar los flujos de calor residuales presentes en el proceso y construir un perfil energético de la planta, identificando las operaciones con mayor demanda de energía y aquellas que generaban mayores pérdidas de calor.

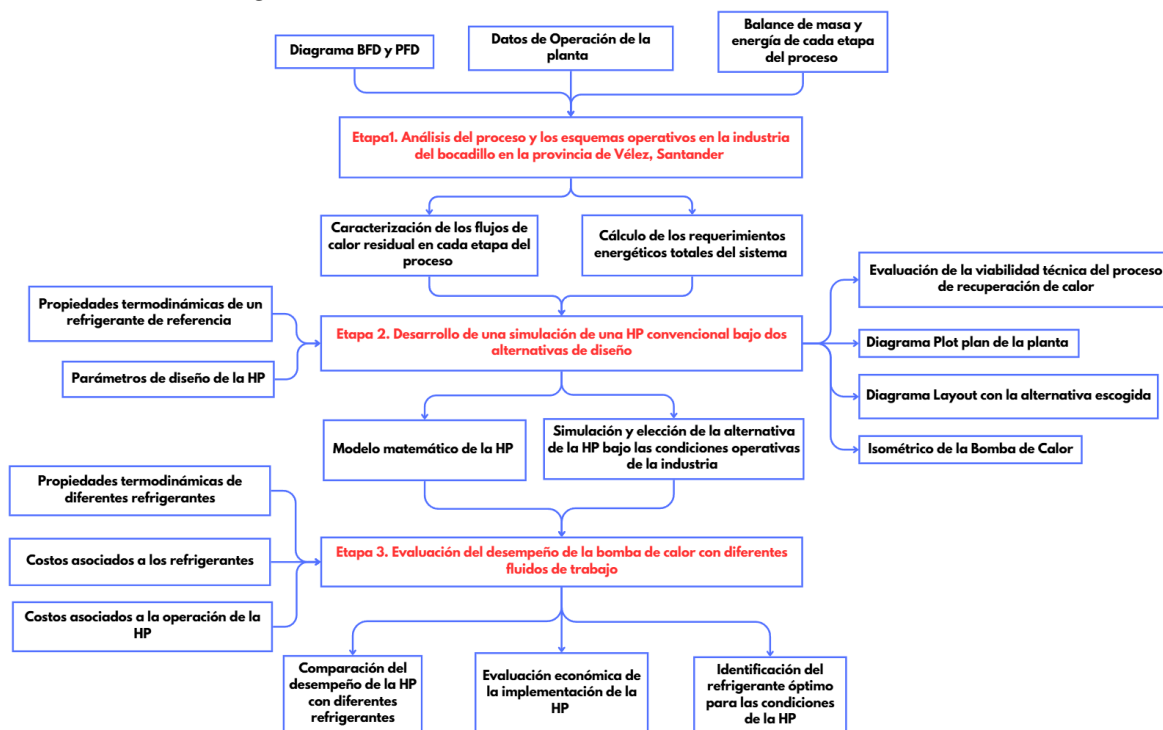
La segunda etapa correspondió al desarrollo y simulación de una bomba de calor estándar bajo dos alternativas de diseño, adaptadas a las condiciones operativas de la planta. A partir de esta simulación se evaluó la viabilidad técnica y la factibilidad de implementación, así como el desempeño del sistema, estableciendo recomendaciones específicas y representando la alternativa seleccionada en diagramas de *Layout*, *Plot Plan* y vista isométrica.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Finalmente, en la tercera etapa, se evalúa el comportamiento de la HP diseñada utilizando diferentes fluidos de trabajo, considerando tanto sus propiedades termodinámicas como sus costos asociados, con el fin de determinar el potencial económico y según estos resultados, se selecciona el fluido de trabajo óptimo y las condiciones operativas que mejoran el rendimiento de la HP.

Figura 2

Descripción de la metodología.



5. Resultados

5.1. Análisis del proceso seleccionado

La Figura 3 representa el diagrama de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo en la planta El Horizonte S.A.S. El sistema opera por lotes, con un procesamiento fijo de materia prima por ciclo. En cada lote se emplean 2.040 kg de guayaba (corriente 1), 1.200 kg de azúcar (20), 360 kg de agua de servicio industrial (a) y 150 kg de carbón (b), además de insumos complementarios como solución desinfectante a base de amonio (4) y hoja de bijao (28). El vapor de servicio industrial (a) se genera a partir de la combustión del carbón con aire (c), incorporando

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

un sistema de recirculación de condensados del vapor no aprovechado (21 y 21.1). Como producto final (29) se obtiene 1.709,57 kg de bocadillo por lote, con un tiempo promedio de producción de 2 horas y 30 minutos. Los residuos generados corresponden a guayaba no apta (2), impurezas de desinfección (6), cáscaras (15), semillas (16), humedad del secado (13 y 24), desperdicios de corte (26) y gases de combustión (d). Bajo estas condiciones, se alcanzarán aproximadamente 3 lotes diarios con una producción estimada de 5.127 kg de bocadillo, lo que corresponde a una producción anual de alrededor de 1.617 toneladas. El balance global en la Figura 3 es especificado con las corrientes de proceso, entrada: 1, 4, 8, 19, 20 y 28 (total de 8.458,2 kg/lote), y salida: 2, 6, 10, 11, 15, 16, 22, 24, 26 y 29 (total de 8.458,2 kg/lote). Las corrientes etiquetadas con letras corresponden a flujos de servicios industriales.

En relación con la Figura 4, la cual presenta el diagrama BFD, el proceso inicia en la caldera, donde ingresan agua de proceso (e), carbón (b) y aire (c), generando vapor de agua (f) y gases de chimenea (d). La guayaba recibida (1) se somete a selección (3), con descarte de fruta no apta (2), seguida de lavado con solución desinfectante a base de amonio (4), obteniéndose guayaba limpia (5) y una corriente residual (6). Posteriormente, el escaldado con vapor (7) y agua (8) produce guayaba escaldada (12), junto con residuos (10) y vapor liberado (11). Tras el secado (13), la guayaba se despulpa, separando cáscaras (15) y semillas (16), y obteniendo pulpa (17). La cocción de la jalea en marmita se efectúa con vapor de agua (18), agua (19) y azúcar (20), generando jalea cocida (23), vapor (22) y condensados (21), que se recircula a la caldera (21.1). Posteriormente, la jalea pasa por el secado y extendido (24 y 25), para luego ser cortada, etapa en la que se generan desperdicios (26) y bocadillo en bloque (27). Finalmente, el producto se empaca en hoja de bijao (28), obteniéndose como salida final el bocadillo terminado y empacado en cajas de 480 g con 12 unidades (29).

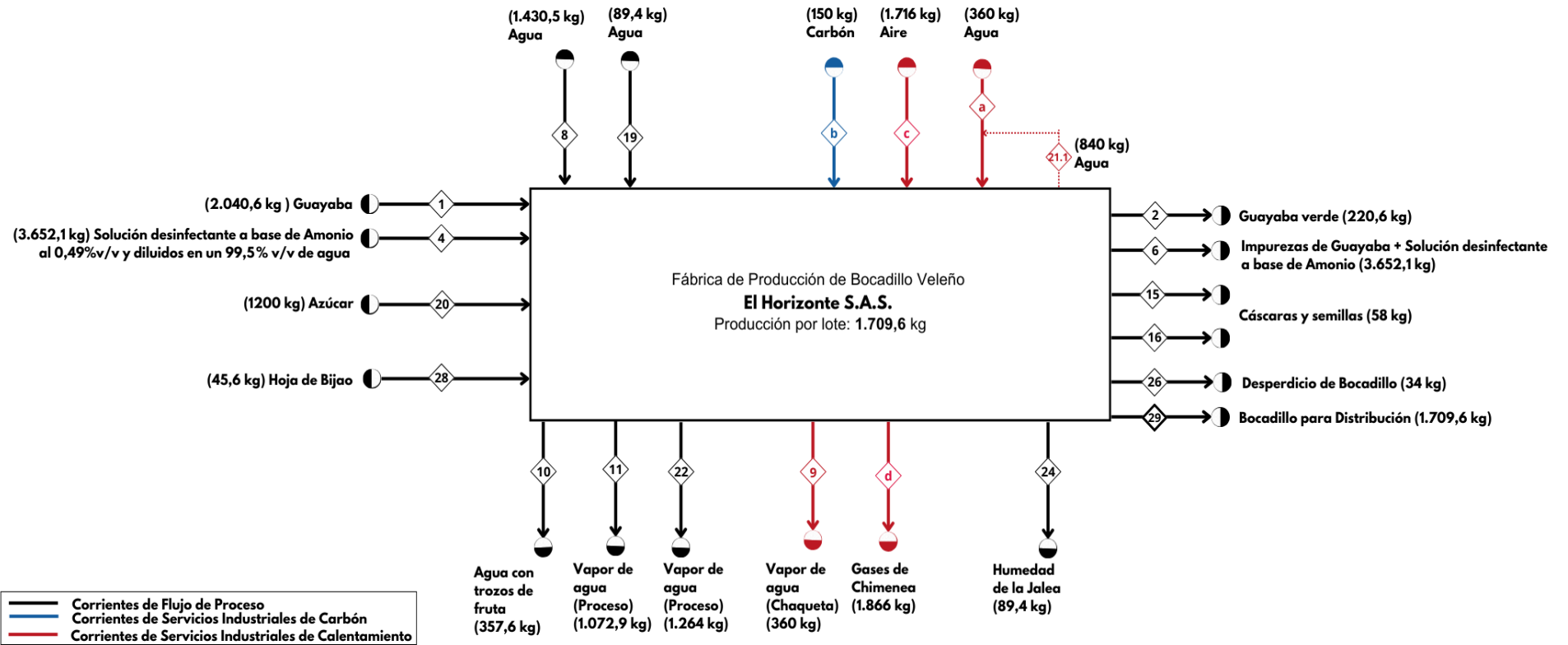
DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Asimismo, la Figura 6 presenta el diagrama PFD, en el cual se describe con mayor precisión que en el BFD el funcionamiento interno de las unidades de operación. En este diagrama se evidencia la distribución del vapor de servicio a las chaquetas de los equipos durante el escaldado y la cocción en marmita, asegurando la transferencia de energía requerida. También se observa la configuración de la caldera, donde la energía de combustión se transfiere al agua de alimentación, generando el vapor de servicio. Adicionalmente, se identifica la ausencia de lazos de control automáticos, por lo que se realizan monitoreos manuales de variables como temperatura, tiempo, textura, pH y cantidad de jalea en los moldes, garantizando el cumplimiento de las condiciones de operación en las etapas de corte y empaque. Los resultados consolidados del balance de masa del proceso se presentan en la Tabla 1.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 3

Diagrama de Entradas y Salidas (E/S) del proceso de producción de Bocado – El Horizonte S.A.S.



DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

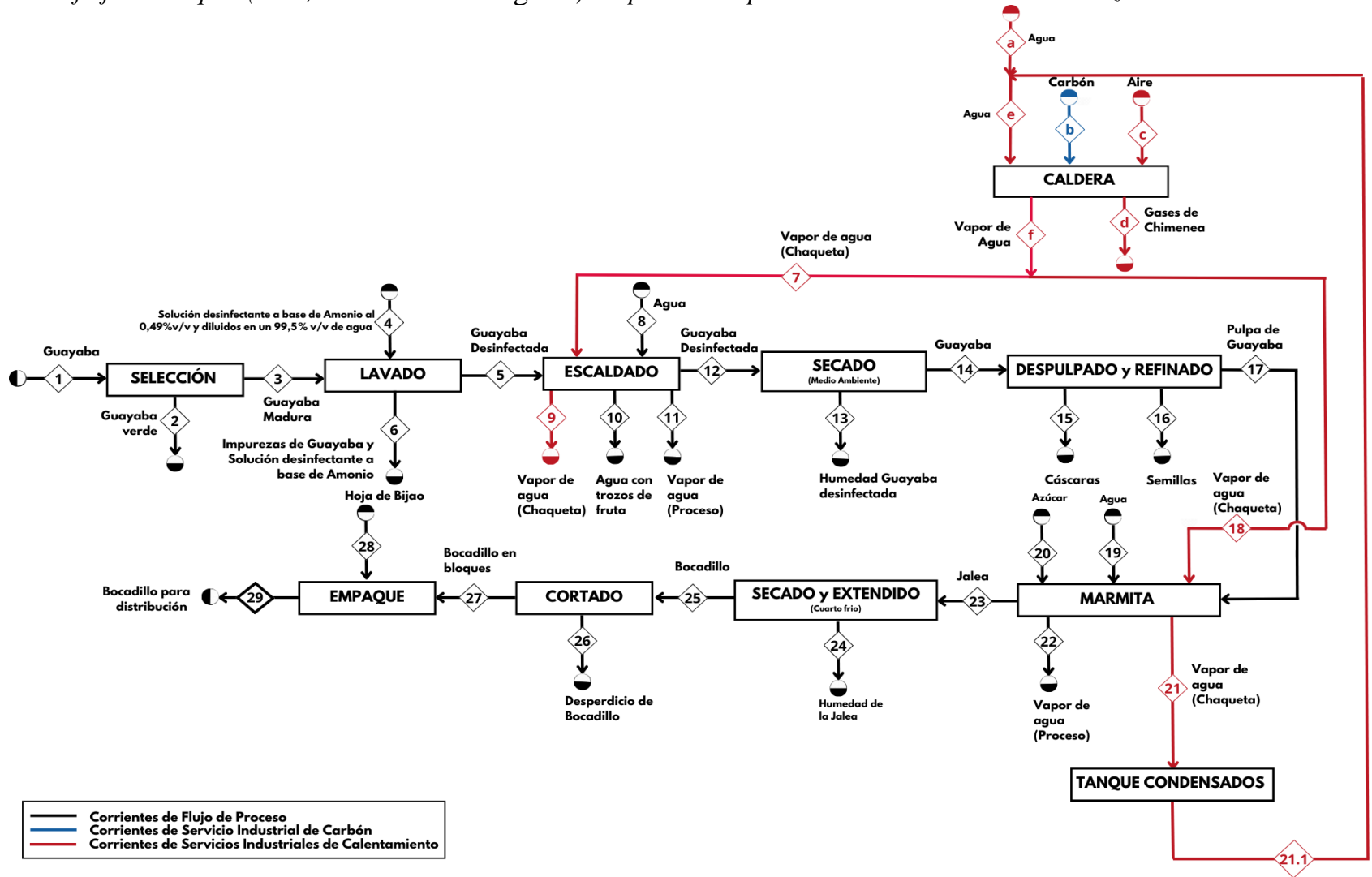
Flujo de Carbón [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Desinfectante [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Bocado en Bloque [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.787,3	89,4	1.698	34
Flujo de Nitrógeno [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Oxígeno [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Dióxido de Carbono [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Hoja de Bijao [Kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

	27	28	29	a	b	c	d	e	f
Temperatura [°C]	22	22	22	22	22	22	200	57,8	130,6
Presión [kPa]	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	275,8
Flujo Total [kg]	1.664	45,6	1.709,6	360	150	1.716	1.866	1.200	1.200
Flujo de Agua [kg]	-	-	-	360	-	-	-	1.200	1.200
Flujo de Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Pulpa de Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Residuos Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Azúcar [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Carbón [kg]	-	-	-	-	150	-	-	-	-
Flujo de Desinfectante [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Bocado en Bloque [kg]	1.664	-	1.709,6	-	-	-	-	-	-
Flujo de Nitrógeno [kg]	-	-	-	-	-	1.316	1.316	-	-
Flujo de Oxígeno [kg]	-	-	-	-	-	400	-	-	-
Flujo de Dióxido de Carbono [kg]	-	-	-	-	-	-	550	-	-
Flujo Hoja de Bijao [Kg]	-	45,6	-	-	-	-	-	-	-

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 4

Diagrama de flujo en bloques (BFD, Block Flow Diagram) del proceso de producción de Bocadoillo – El Horizonte S.A.S.



DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 5

Documentación fotográfica del proceso productivo de bocadillo – El Horizonte S.A.S.



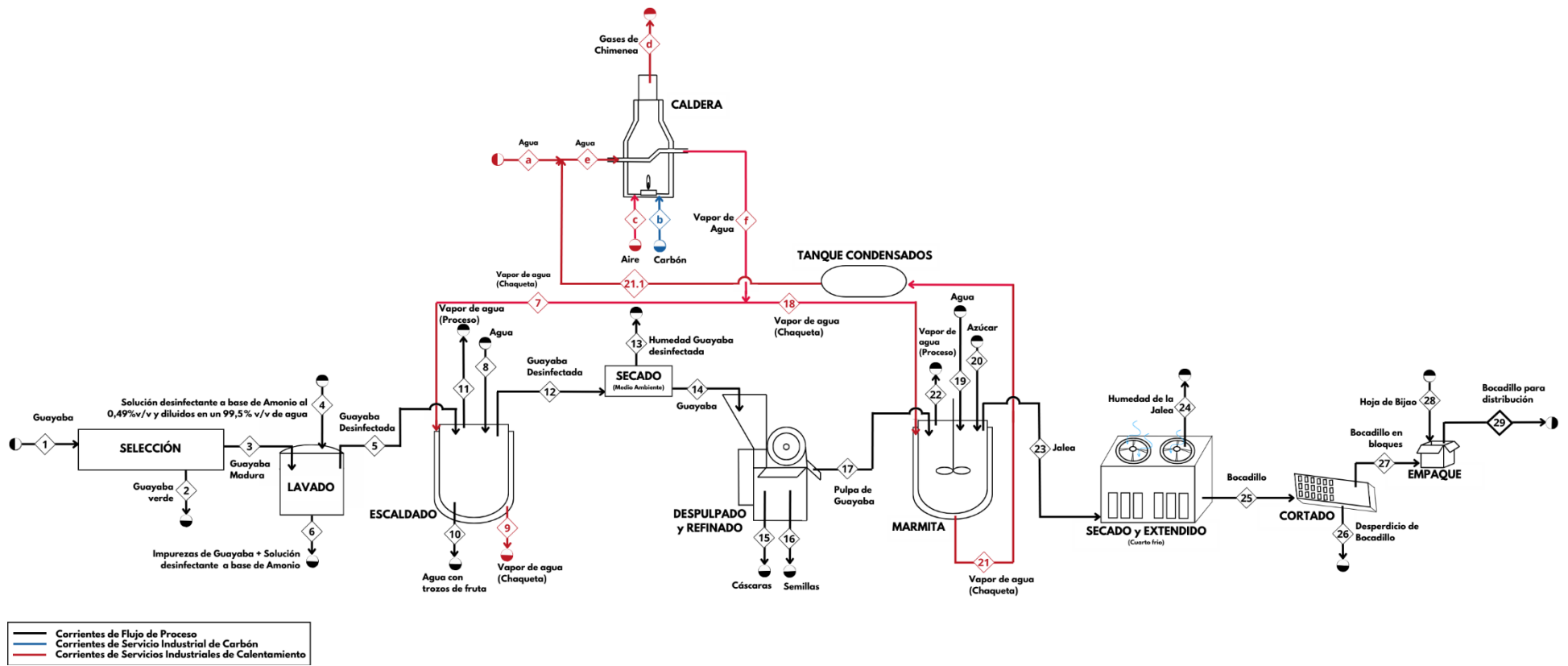
Nota. Imágenes suministradas por la empresa El Horizonte S.A.S., correspondientes a su planta de producción de bocadillo ubicada en el municipio de Vélez, Santander.

La Figura 7 presenta el perfil energético de la planta, en el cual se identifican las etapas de mayor demanda y las principales pérdidas térmicas. La caldera constituye el mayor consumidor de energía (2.973.480 kJ/lote), seguida del escaldado (834.570 kJ/h) y la cocción en marmita (468.634 kJ/lote). Se determina que aproximadamente el 55 % del calor generado en la caldera se pierde durante el transporte del vapor, debido al deficiente aislamiento de las tuberías y a la distancia entre la caldera y las áreas de operación.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 6

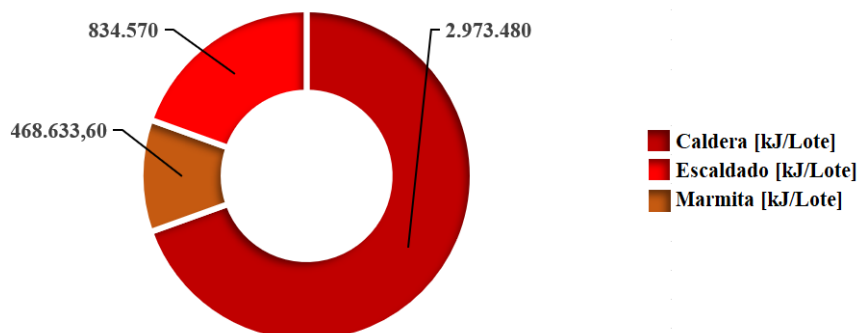
Diagrama de flujo de proceso (PFD, Process Flow Diagram) del proceso de producción de Bocadoillo – El Horizonte S.A.S



DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 7

Perfil energético térmico por operación unitaria de la planta de producción de Bocadoillo – El Horizonte S.A.S



A partir de esta información se evaluaron las corrientes de salida asociadas a la transferencia de energía, identificándose la posibilidad de recuperar el calor residual del vapor en la chaqueta del escaldado (corriente 9) y del calor liberado por los gases de chimenea de la caldera (corriente d). Es importante mencionar que, como aporte del presente trabajo, se entregan a la empresa El Horizonte S.A.S. el diagrama de entradas y salidas, BFD, PFD y los balances de masa y energía.

5.2. Diseño de una Bomba de Calor

De la sección anterior, se evaluaron dos alternativas de diseño de la HP para el suministro de energía térmica a la nueva marmita adquirida por la empresa, con el fin de incrementar la capacidad de producción de bocadoillo bajo criterios de eficiencia y sostenibilidad.

5.2.1. Alternativa 1.

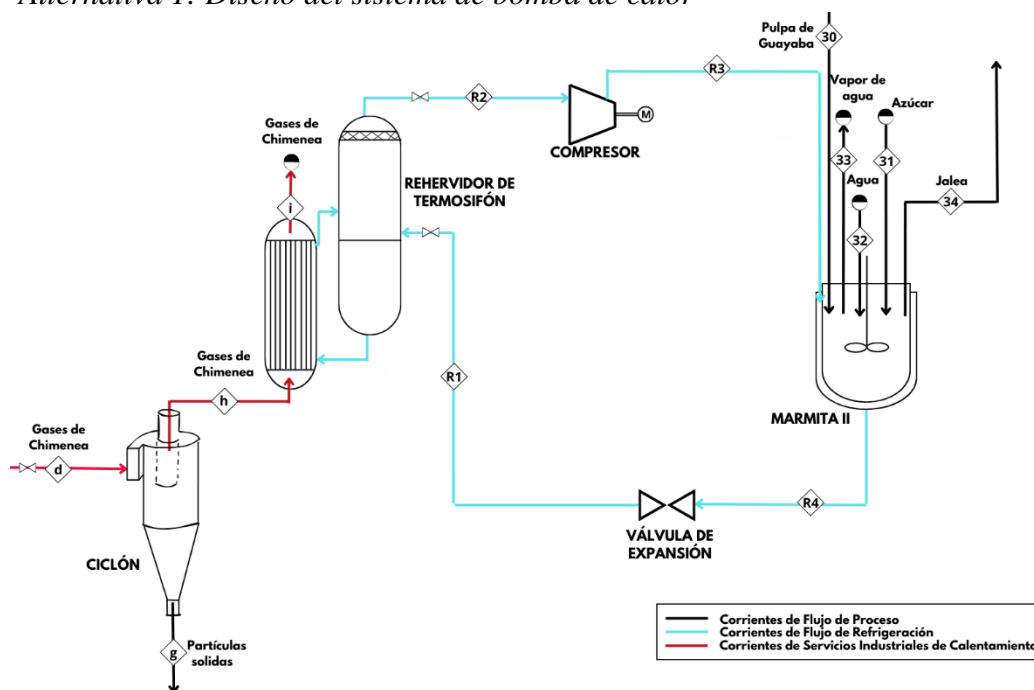
La Figura 8 ilustra la primera alternativa propuesta, basada en el aprovechamiento del calor residual de los gases de chimenea (d). Estos gases atraviesan un ciclón que retira la ceniza volante generada por la combustión de carbón (h), reduciendo su contenido de contaminantes (g), para

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

luego transferir su energía al evaporador, donde el refrigerante (R2) se vaporiza. Posteriormente, los gases se liberan al ambiente (i) en cumplimiento de la Resolución 941 de 2003, que exige su evacuación segura debido a la presencia de sustancias tóxicas. El vapor de refrigerante comprimido (R3) se conduce a la marmita, transfiriendo calor útil a través de la chaqueta térmica; después pasa por la válvula de expansión (R4), disminuyendo su presión y temperatura, y retorna al evaporador (R1), cerrando el ciclo. Para este análisis preliminar se consideró agua como refrigerante.

Figura 8

PFD – Alternativa 1: Diseño del sistema de bomba de calor



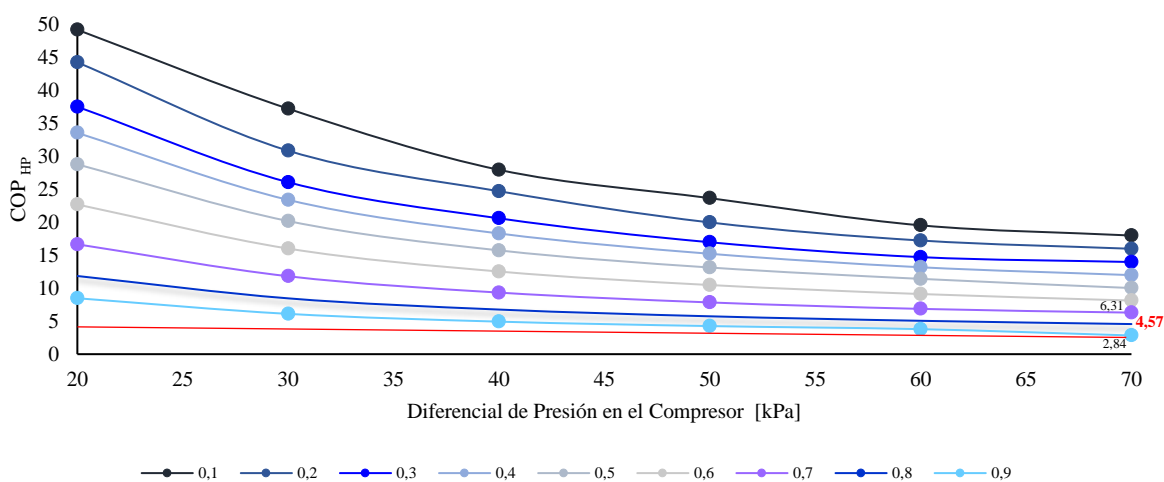
La Figura 9 representa la variación del COP con la presión de salida del compresor obtenida por simulación en Aspen HYSYS para la alternativa 1. Se verificó que el COP se mantuvo dentro del rango de 3 a 5 reportado en la literatura para HPs (Tello-Oquendo, et al., s.f.), identificándose que a 70 kPa el sistema alcanzaba un valor eficiente. Este valor se adoptó como condición de diseño, en concordancia con criterios heurísticos que recomiendan limitar la presión de descarga para evitar incrementos en el consumo eléctrico del compresor (Madani, et al., 2010). Asimismo, la Figura 9 evidencia que una fracción de vapor elevada a la entrada del evaporador favorece la

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

transferencia de calor, evitando la entrada de líquido al compresor y mejorando el COP global. Con base en ello, y considerando las heurísticas de operación para compresores y evaporadores, se definió como criterio de diseño una fracción de vapor de 0,8, ya que a valores de 0,7 y 0,9 el COP sale de los rangos óptimos de la bomba de calor (3 a 5). El COP obtenido bajo estas condiciones es de 4,59, valor representado en la línea roja de la Figura 9, el cual se encuentra dentro del intervalo sugerido en la literatura.

Figura 9

Efecto de la Diferencia de Presión y la Fracción de Vapor sobre el COP del Sistema



El evaporador se diseñó como rehervidor de termosifón bajo los lineamientos TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*), aprovechando la circulación natural en la carcasa que evita bombeo adicional y optimiza el diferencial de densidades líquido–vapor (Perry, et al., 2001). De acuerdo a las heurísticas de asignación de fluidos, los gases de chimenea se condujeron por los tubos, permitiendo mayores presiones admisibles, reduciendo zonas de baja velocidad y facilitando la limpieza, lo que minimiza ensuciamiento y caída de presión (Smith, 2016). Asimismo, el compresor se diseñó como de una sola etapa, conforme a heurísticas basadas en la relación entre la presión de salida y la de entrada menor a 4 (Towler & Sinott, 2013).

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Los resultados de la simulación muestran que, al aprovechar todo el calor residual, la jalea alcanza 105,1 °C, valor superior al límite de cocción (86 °C). Con la carga completa (3051 kg/lote) y menor transferencia, la temperatura es de 58,15 °C, insuficiente para el proceso. Por ello, se establece como condición de operación una reducción de la carga a 52,44 % (1600 kg/lote), alcanzando el límite requerido de cocción. A su vez, se determina que el diferencial de presión entre la salida de la marmita y la entrada al rehervidor debe superar en 5 kPa el mínimo requerido por la válvula de expansión (63 kPa). Por lo tanto, el diseño se estableció en 68 kPa, asegurando el flujo continuo del refrigerante y evitando el retroceso del fluido.

Tabla 2*Corrientes del sistema de bomba de calor -Alternativa 1*

	R1	R2	R3	R4	h	i	Σ30,31,32	Σ33,34
Temperatura [°C]	100	100	165,6	114,1	200	102,1	22	86
Presión [kPa]	101,3	101,3	171,3	164,3	101,3	101,3	101,3	50,7
Flujo Másico [kg]	400	400	400	400	1866	1866	1600	1600
ΔEntalpía [kJ/kgmol]	0	10.000,0	10.000	20.000	0	5.000	385.000	13.000

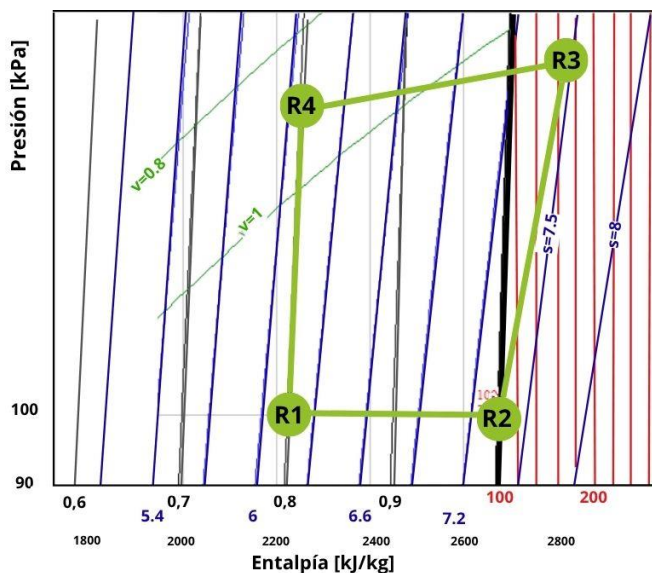
La Tabla 2 y la Figura 10 presentan el ciclo de la bomba de calor, el cual inicia con una fracción de vapor de 0,8 en el evaporador y alcanza vapor saturado a la salida. En el compresor, un diferencial de presión de 70 kPa generando vapor sobrecalentado, confirmado mediante el criterio $C_p^{IG} * T_o * \eta < \lambda$, derivado de la ecuación de Clausius-Clapeyron que analiza la energía añadida durante la compresión con el calor latente del vapor, lo cual permite predecir el estado final del vapor de una manera directa, donde C_p^{IG} representa la capacidad calorífica del gas ideal, T_o temperatura de entrada en el compresor, η la eficiencia isentrópica del compresor y λ el calor latente (Felbab, 2013). La temperatura de saturación a 171,3 kPa es de 115,4 °C, inferior a la descarga del compresor (165,6 °C), validando la condición de sobrecalentamiento (Smith, 2016).

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Finalmente, el refrigerante transfiere calor en la marmita, sufriendo una caída de presión de 4 kPa y retornando al evaporador tras la válvula de expansión en un proceso isoentálpico, cerrando el ciclo. El cambio energético del fluido de trabajo en la Alternativa 1 es visualizado en la Figura 10. El fluido ingresa al evaporador (Corriente R1, Figura 8) en fase liquido-vapor y, a medida que avanza en el proceso de evaporación, experimenta un incremento progresivo en su entalpía y un aumento en la entropía, hasta alcanzar la condición de vapor saturado (Corriente R2, Figura 8). El compresor eleva la presión, lo que se refleja en un aumento de su energía interna y un ligero cambio en la entropía, debido al carácter isoentrópico ideal del proceso (Corriente R3, Figura 8). En el condensador, el fluido libera al medio la energía absorbida en el evaporador más el trabajo de compresión, lo que se refleja en una disminución de entalpía y entropía a presión casi constante (Corriente R4, Figura 8). La válvula de expansión provoca una caída de presión y un ligero cambio en entalpía, retornando a las condiciones iniciales del ciclo (Corriente R1, Figura 8).

Figura 10

Diagrama Presión-Entalpía del R718 (Agua) con Representación del Ciclo de la HP-Alternativa 1



Nota. Elaboración mediante el simulador CoolPack

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

La Tabla 3 representa el dimensionamiento de los equipos, donde la bomba de calor absorbe 180.605,50 kJ/lote de los gases de chimenea y transfiere 231.257,67 kJ/lote a la marmita, alcanzando un COP de 4,56 dentro del rango reportado en la literatura (Schlosser , et al., 2020).

Tabla 3

Parámetros de diseño Bomba de calor- Alternativa 1

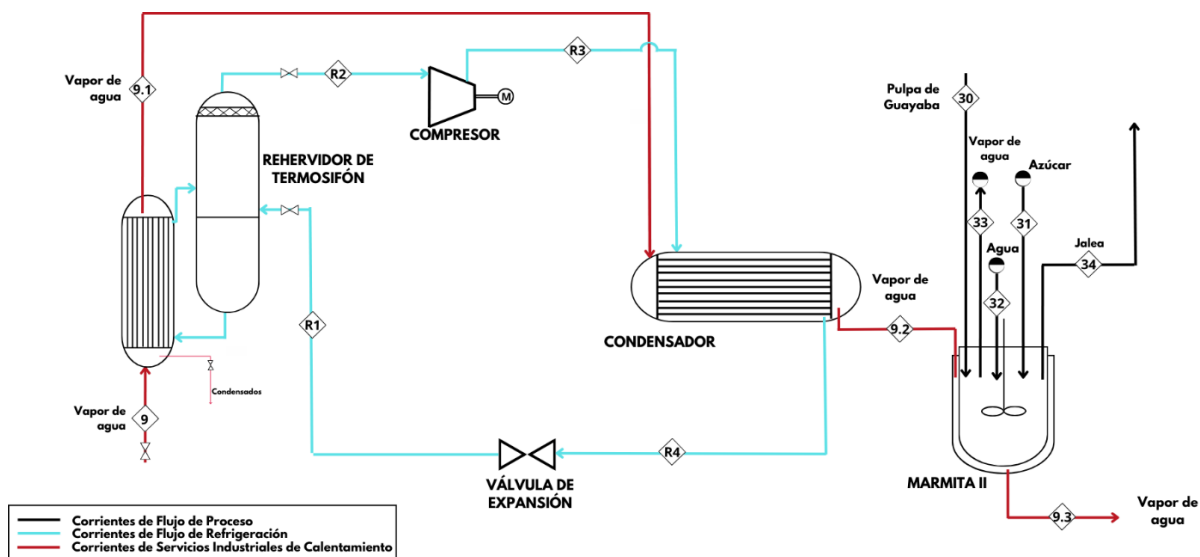
Parámetro	Evaporador	Compresor	Marmita	Válvula de expansión
Carga térmica útil [kJ/lote]	180.605,5	-	231.257,7	-
Potencia consumida [kW]	-	14,1	-	-
COP	4,56	-	-	-
Área de transferencia [m ²]	7,54	-	-	-
Coefficiente de transferencia de calor [kJ/h m ² °C]	989,4	-	2.562,1*	-
Numero de tubos	80	-	-	-
Diámetro externo de la tubería [m]	0,02	-	-	-
Diámetro interno de la tubería /Chaqueta[m]	0,016	-	0,1	0,05
Longitud de tubos [m]	1,5	-	-	0,1
Diámetro de la carcasa[m]	0,53	-	1,1	-
Volumen Tubos [m ³]	0,024	-	-	-
Volumen Carcasa [m ³]	0,29	-	-	-
Apertura de la válvula [%]	-	-	-	50
Altura [m]	-	-	1,75	0,2
Eficiencia [%]	-	76,5	-	-
Capacidad [m ³ /h]	-	669,4	-	-

* La información se obtuvo a partir de los datos reales de la marmita proporcionados por la empresa, de acuerdo con lo desarrollado en el Anexo 2, correspondiente al balance de energía (Sección 2.3.1), donde se determina el coeficiente global de transferencia de calor de la marmita.

5.2.2. Alternativa 2

La Figura 11 presenta la segunda alternativa, en la que el vapor de agua de servicio industrial (9) transfiere calor en un rehervidor de termosifón, vaporizando el refrigerante (R2). Este se comprime (R3) y condensa, liberando energía al proceso (9.2) para alimentar la marmita mediante la chaqueta térmica. Luego pasa por la válvula de expansión (R4) y retorna al evaporador (R1), cerrando el ciclo. En esta configuración se empleó agua como refrigerante.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 11*PFD – Alternativa 2: Diseño del sistema de bomba de calor*

Para la Alternativa 2, se determinó que el efecto del diferencial de presión del compresor y la fracción de vapor a la entrada del evaporador sobre el COP era equivalente al observado en la Alternativa 1. Por ello, se adoptaron estos valores como heurísticas de diseño, fijando la presión en 70 kPa y la fracción de vapor en 0,8. Con estas condiciones, el sistema alcanza un COP de 4,18, dentro del rango reportado en la literatura (Tello-Oquendo, et al., s.f.).

El condensador se seleccionó tipo AKS con cabezal frontal A, carcasa K y cabezal posterior S, lo que permite flujos independientes, fácil desmontaje y limpieza, garantizando mantenimiento e inocuidad en procesos alimentarios (Perry, et al., 2001)). Complementariamente, el evaporador se diseñó como rehervidor de termosifón bajo lineamientos TEMA, aprovechando la circulación natural para generar vapor sin bombeo y minimizando riesgos de ensuciamiento y pérdida de eficiencia ante posibles trazas de contaminantes provenientes del escaldado (Smith, 2016). Asimismo, el compresor se diseñó como de una sola etapa, conforme a heurísticas basadas en la relación entre la presión de salida y la de entrada menor a 4 (Towler & Sinott, 2013).

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

La evaluación del aprovechamiento del calor residual del vapor de la chaqueta del escaldado determino que su uso directo (corriente 9) como fuente de energía en la marmita solo permite producir 67,68 kg de bocadillo (4 % de la capacidad total), y la sustitución del condensador por la marmita alcanza el 0,81 % de la capacidad. Estas limitaciones hacen inviables ambas opciones por falta de producción. Por ello, se adoptó la configuración de la Figura 11, que requiere 75 kg de refrigerante y permite operar la marmita a carga completa bajo condiciones normales de planta, cumpliendo los parámetros térmicos de cocción de la jalea. Además, se definió que el diferencial de presión entre la salida del condensador y la entrada al rehervidor de termosifón debe superar en 5 kPa el mínimo requerido por la válvula de expansión; dado que el ΔP mínimo es de 56 kPa, la condición de diseño se fija en 61 kPa, garantizando el flujo adecuado del refrigerante y evitando el retroceso del fluido.

Tabla 4

Corrientes del sistema de bomba de calor -Alternativa 2

	R1	R2	R3	R4	9	9.1	9.2
Temperatura [°C]	98,2	96,1	169,2	111,6	100	98,9	114,1
Presión [kPa]	95	88	158	151	101,3	97,3	93,3
Flujo Másico [kg]	75	75	75	75	360	360	360
Δ Entalpía [kJ/kgmol]	0	10.000	10.000	20.000	0	10.000	10.000

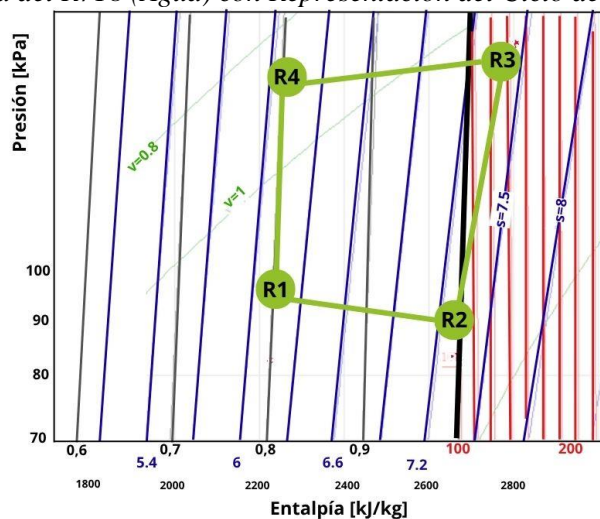
La Tabla 4 y Figura 12 presenta el ciclo de la bomba de calor, que inicia con una fracción de vapor de 0,8 en el evaporador, alcanzando vapor saturado a su salida. En el compresor, un diferencial de presión de 70 kPa que genera vapor sobrecalentado, confirmado mediante el criterio $C_p^{IG} * T_o * \eta < \lambda$, derivado de la ecuación de Clausius-Clapeyron que analiza la energía añadida durante la compresión con el calor latente del vapor, lo cual permite predecir el estado final del vapor de una manera directa, donde C_p^{IG} representa la capacidad calorífica del gas ideal, T_o

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

temperatura de entrada en el compresor, η la eficiencia isoentrópica del compresor y λ el calor latente (Felbab, 2013). La temperatura de saturación a 158 kPa es de 112,9 °C, inferior a la descarga del compresor (169,2 °C), validando la condición de sobrecalentamiento (Smith, 2016). Posteriormente, el refrigerante transfiere calor en el condensador, sufriendo una caída de presión de 7 kPa y retorna al evaporador tras la válvula de expansión en un proceso isoentálpico, completando el ciclo. El cambio energético del fluido de trabajo en la Alternativa 2 es visualizado en la Figura 12. El fluido ingresa al evaporador (Corriente R1, Figura 11) absorbiendo calor del flujo residual, aumentando su entalpía y entropía a medida que va disminuyendo su presión ligeramente hasta alcanzar la condición de vapor (Corriente R2, Figura 11). El compresor, aumenta la presión y la entalpía con una variación reducida de entropía, elevando la energía del fluido (Corriente R3, Figura 11). En el condensador, el refrigerante cede calor al proceso, disminuyendo la entalpía y entropía, alcanzando la fase liquido-vapor (Corriente R4, Figura 11). La válvula de expansión provoca una caída de presión y un ligero cambio en entalpía, retornando a las condiciones iniciales del ciclo (Corriente R1, Figura 11).

Figura 12

Diagrama Presión-Entalpía del R718 (Agua) con Representación del Ciclo de la HP-Alternativa2



Nota. Elaboración mediante el simulador CoolPack

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

La Tabla 5 representa el dimensionamiento de los equipos, donde la bomba de calor absorbe 33.685,86 kJ/lote de los gases de chimenea y transfiere 360.727,06 kJ/lote a la marmita, alcanzando un COP de 4,18, lo que evidencia una alta eficiencia en la recuperación y transferencia de calor dentro del ciclo de refrigeración (Schlosser , et al., 2020).

Tabla 5*Parámetros de diseño Bomba de calor- Alternativa 2*

Parámetro	Evaporador	Compresor	Condensador	Válvula de expansión
Carga térmica útil [kJ/lote]	33.685,9	-	43.071,9	-
Potencia consumida [kW]	-	2,94	-	-
COP	4,18	-	-	-
Área de transferencia [m ²]	7,5	-	15,08	-
Coefficiente global de transferencia de calor [kJ/h m ² °C]	2.434	-	135	-
Numero de tubos	80	-	160	-
Diámetro externo de la tubería [m]	0,02	-	0,02	-
Diámetro interno de la tubería [m]	0,016	-	0,016	0,05
Longitud de tubos [m]	1,5	-	1,5	0,1
Diámetro de la carcasa[m]	0,53	-	0,74	-
Volumen Tubos [m ³]	0,024	-	0,048	-
Volumen Carcasa [m ³]	0,29	-	0,57	-
Apertura de la válvula [%]	-	-	-	50
Altura [m]	-	-	-	0,2
Eficiencia [%]	-	76,6	-	-
Capacidad [m ³ /h]	-	143,2	-	-

5.2.3. Alternativas de Diseño de la Bomba de Calor Seleccionada

La selección de la alternativa favorable para la planta se realizó mediante criterios económicos que permitan evaluar y comparar el desempeño financiero de cada alternativa.

La Tabla 6 presenta el análisis del Potencial Económico 2 (PE₂), calculado conforme al Anexo 3 (Balance Económico). En operación normal, el PE₂ de la empresa es de \$5.028.934,4. La implementación de la Alternativa 1 genera un incremento del 52 % respecto a este valor, mientras que la Alternativa 2 alcanza un aumento del 100 %.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Tabla 6*Comparación del Potencial Económico (PE₂) bajo diferentes alternativas de operación*

Alternativas de Evaluación	Potencial Económico PE₂ (\$COP/lote)
El Horizonte S.A.S. – Base (operación actual)	5.028.934,4
El Horizonte S.A.S. – Alternativa 1	7.669.313,6
El Horizonte S.A.S. – Alternativa 2	10.158.218,8

La Tabla 7, evalúa los gastos de capital (CAPEX) asociados a la adquisición e instalación de los equipos para cada alternativa, incluyendo los costos de traslado según lo detallado en el Anexo 3 (Balance Económico). La Alternativa 2 presentó un gasto mayor, con una diferencia de \$11.211.087 respecto a la Alternativa 1, manteniendo la misma cantidad de equipos. Asimismo, la Tabla 7 representa los gastos operativos (OPEX) asociados al incremento en el uso de servicios industriales para cada alternativa, con énfasis en el consumo energético del compresor. Este se estima a partir del precio del kilovatio hora (kWh) en la región de Vélez, Santander, equivalente a 1.134,24 pesos colombianos (\$COP) según la Superintendencia de Servicios Públicos. La Alternativa 1 genera un gasto mayor, superando en 12.629 \$COP a la Alternativa 2 debido a su mayor consumo de energía.

Tabla 7*Gastos de Capital (CAPEX) por Equipos y Gastos de Operación (OPEX)*

	Equipo	CAPEX [\$COP]	OPEX [\$COP/lote]
Alternativa 1	Compresor	20.149.999,3	\$ 15.958,8
	Evaporador	28.661.024,3	
	Válvula de expansión	2.721.926,3	
	Ciclón	9.227.334,1	
Total		60.760.283,9	
Alternativa 2	Compresor	7.588.305,9	\$ 3.329,1
	Evaporador	28.661.024,3	
	Válvula de expansión	2.721.926,3	
	Condensador	33.000.113,9	
Total		71.971.370,4	

La Tabla 8 presenta el análisis de CAPEX y OPEX en relación con las ganancias de cada alternativa. La Alternativa 2 registró costos operativos más bajos (OPEX de 2.936.191,6 COP/año frente a 14.075.662,9 COP/año en la Alternativa 1) y generó 1.507.839,9 kg de bocadillo adicional,

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

con un aumento de ganancias de 5.129.284,4 COP. Por tanto, se decide implementar la Alternativa 2 en la planta El Horizonte S.A.S., debido a su mayor rentabilidad económica. Sin embargo, para futuros trabajos se recomienda realizar un análisis de flujo de caja que considere todas las variables económicas, con el fin de evaluar si la alternativa seleccionada mantiene su desempeño bajo dichas condiciones.

Tabla 8*Análisis de costos, producción y rentabilidad por alternativa*

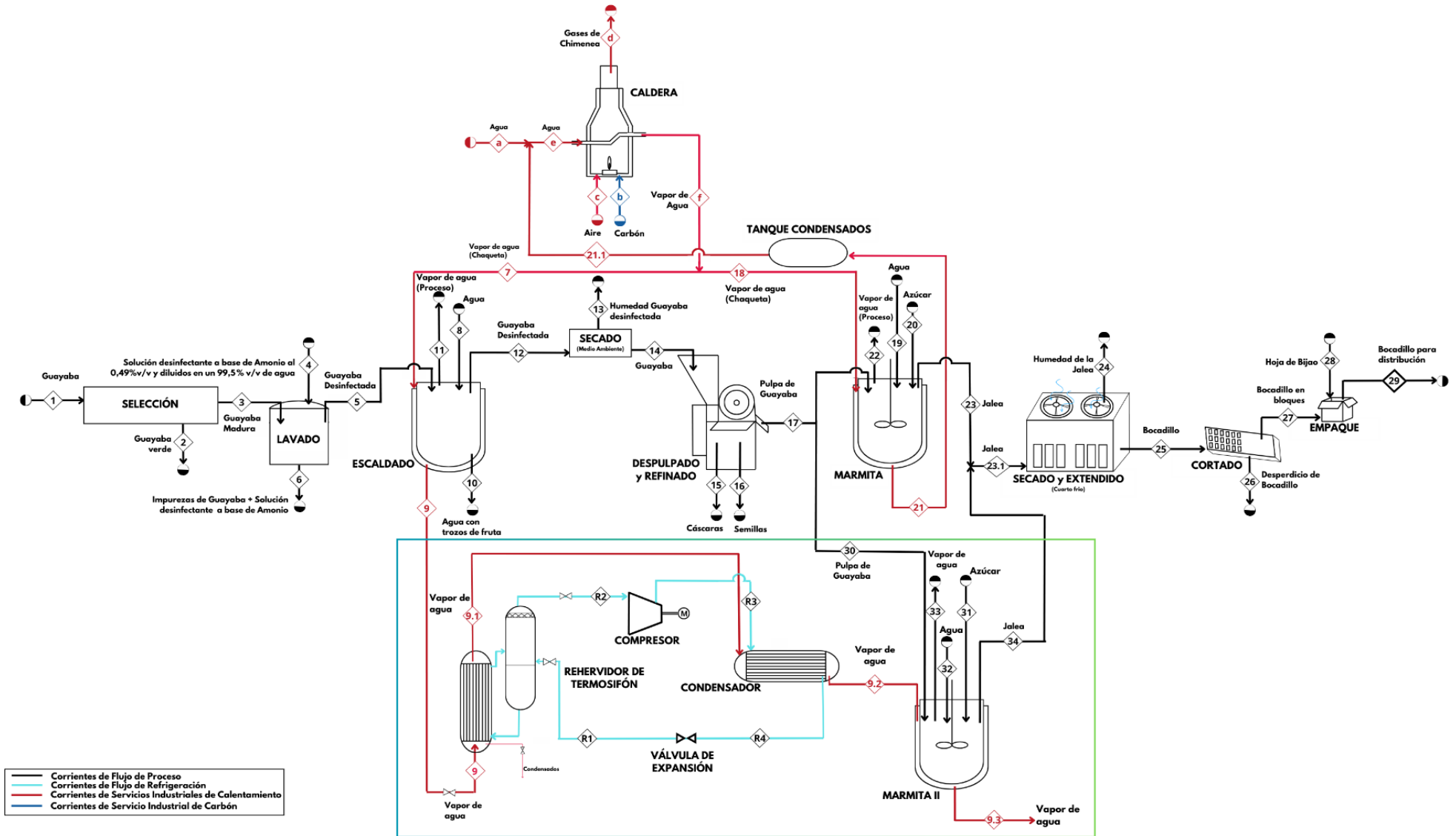
	Alternativa 1	Alternativa 2
Flujo de Agua de trabajo [kg]	400	75
Bocadillo Adicional [kg/año]	782.887,9	1.507.839,9
Potencia del Compresor [kW]	14,1	2,9
Número de equipos adicionales	4	4
OPEX [\$COP/año]	14.075.662,9	2.936.191,6
CAPEX [\$COP]	60.760.283,9	71.971.370,4
OPEX/Bocadillo [\$COP/kg]	17,9	1,9
CAPEX/Bocadillo [\$COP/kg]	77,6	47,7
Aumento de las ganancias [\$COP/lote]	2.640.379,2	5.129.284,4
CAPEX/Aumento ganancias	23	14
OPEX/Aumento ganancias	5,3	0,6

La Figura 13 representa el diagrama de proceso de El Horizonte S.A.S., según la configuración de la Alternativa 2. La instalación incluye la bomba de calor y una marmita adicional para aumentar la producción de bocadillo mediante el aprovechamiento del calor residual del escaldado. En la configuración, el arranque de la bomba se realiza con el rehervidor de termosifón inundado con 75 kg de refrigerante a condiciones ambientales. Luego, el vapor del escaldo se dirige a la superficie de intercambio, aportando energía al refrigerante, y al alcanzar la saturación se conduce al compresor mediante la apertura de la válvula de paso. Simultáneamente, la marmita se carga con agua, azúcar y jalea, iniciándose la transferencia térmica. A medida que aumenta la cesión de calor, el caudal de vapor al compresor se incrementa hasta alcanzar un régimen estable. En caso de condensación en el evaporador, se dispone de una línea de descarga de condensados para garantizar la continuidad del ciclo.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 13

Diagrama de flujo del proceso con integración de bomba de calor – El Horizonte S.A.S.



DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

5.2.4. Escenarios Críticos y Acciones Preventivas en la Bomba de Calor

La Tabla 9 presenta diversos escenarios de falla de la HP, indicando sus consecuencias potenciales y las acciones preventivas o mitigadoras correspondientes. La principal falla corresponde a la rotura o pérdida de contención, que implica emisión de refrigerante o vapor, riesgo para el personal y el ambiente, y daño a equipos. Para lo cual se proponen medidas como aislamiento mediante válvulas, activación de *interlocks* eléctricos para paro de emergencia y uso obligatorio de EPPs.

Tabla 9*Escenarios de falla, consecuencias y acciones preventivas en la bomba de calor*

Equipo	Escenario de falla	Consecuencia	Acciones
Tuberías principales	Rotura o pérdida de contención	Emisión de refrigerante o vapor, riesgo para el personal y el ambiente; daño a equipos	Aislamiento del tramo mediante válvulas de paso; activación de bloqueo de seguridad (<i>interlock</i>) eléctricos para paro de emergencia que desconecte el motor y aisle la unidad; uso obligatorio de EPP
Compresor (motor)	Pérdida de lubricación	Desgaste y fallo mecánico, bloqueo del eje, posible incendio por fricción	Mantenimiento programado; inspección de aceite y rodamientos; activación de <i>interlock</i> eléctricos para paro de emergencia que desconectan el motor.
Rehervidor	Arrastre de líquido por falla del desnebulizador (<i>demister</i>).	Entrada de líquido al compresor (golpe de líquido); contaminación del circuito	Procedimientos de purga; revisión y limpieza programada del desnebulizador (<i>demister</i>).
Líneas de vapor de servicio	Sobrepresión en la línea de vapor	Ruptura de acoples, riesgo térmico para el personal	Purgas y drenajes; inspección periódica; mantenimiento programado; limpieza de tuberías
Condensador	Fuga entre circuitos (rotura de tubos)	Contaminación del producto; pérdida de refrigerante	Limpieza programada de tuberías; pruebas hidráulicas periódicas
Válvula de expansión	Obstrucción o falla mecánica	Inundación por exceso de refrigerante, la falta de refrigerante, las variaciones térmicas y el retorno de líquido.	Filtrado en línea; accesibilidad para reemplazo rápido; disponibilidad de repuestos; inspección visual y limpieza programada

5.2.5. Configuración del *Plant Plot, Layout* y vista isométrica de la Alternativa escogida

La Figura 14 representa la planta de producción de El Horizonte S.A.S., en vista plano superior, con una disposición de áreas y procesos que asegura flujo continuo, accesibilidad y condiciones de seguridad, cumpliendo distancias mínimas de 0,8 m en zonas de trabajo y 1,5 m entre equipos con órganos móviles (Ministerio del Trabajo de Colombia, 1979). La ubicación del área de servicios industriales permite la integración de la bomba de calor. La Figura 15 presenta

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

una ampliación de la Figura 14, ilustrando el *layout* en vista superior. Las distancias entre equipos están basadas en las heurísticas de distanciamiento de equipos descritas en el Anexo 6 (Ray & Das, 2020) evidenciando distancias mínimas de 15 m entre calderas, intercambiadores o compresores y 1,5 m entre intercambiadores de la bomba de calor y el compresor, así como la disposición de las líneas de proceso.

La Figura 16 da la vista isométrica de la bomba de calor implementada en El Horizonte S.A.S., mostrando la disposición de las tuberías de fluido caliente en la parte superior, soportadas por una estructura metálica, y de fluido frío en la parte inferior de la planta. El equipo que requiere mayor elevación es el rehervidor de termosifón, el cual cuenta con su propia estructura de soporte. Además, la figura detalla la configuración general de la red de tuberías, incluyendo acoples, codos, válvulas de paso, válvula de expansión e instrumentos de medición de temperatura. La Tabla 10 presenta las especificaciones de tuberías e instrumentos según la codificación de la Figura 16, facilitando la identificación de cada sección de la bomba de calor.

Tabla 10*Requerimientos de tuberías y accesorios*

Sección	Cedula de la Tubería **	Diámetro de la Tubería [in]**	Longitud de la tubería [m]**	Número de codos	Tipo de codos	Número de válvula	Tipo de válvulas
1	¾"-NR-00001-AA1	¾"	4,07	3	2 codos suaves de 90° enroscado 1 codo enroscado de 45°	1	Válvula de paso (bola)
2	¾"-NR-00002-AA1	¾"	3,37	3	Codo suave de 90° enroscado	1	Válvula de paso (bola)
3	¾"-NR-00003-AA1	¾"	4,82	2	Codo suave de 90° enroscado	-	-
4	¾"-NR-00003-AA1	¾"	2,08	1	Codo enroscado de 45°	1	Válvula de expansión
5	1 ½"-UW-00005-AA1	1 ½"	24,86	5	Codo suave de 90° enroscado	1	Válvula de paso (bola)
6	1 ½"-UW-00006-AA1	1 ½"	3,64	3	Codo suave de 90° enroscado	-	-
7	1 ½"-UW-00007-AA1	1 ½"	7,24	4	Codo suave de 90° enroscado	-	-
8	¾"-RC-00008-AA1	¾"	1	-	-	1	Válvula de paso (bola)

** La información se obtuvo a partir de los cálculos desarrollados en el Anexo 4, aplicando heurísticas para la estimación de tuberías y accesorios, y la normativa establecida por la ISA (Instrument Society of Automation)

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 14

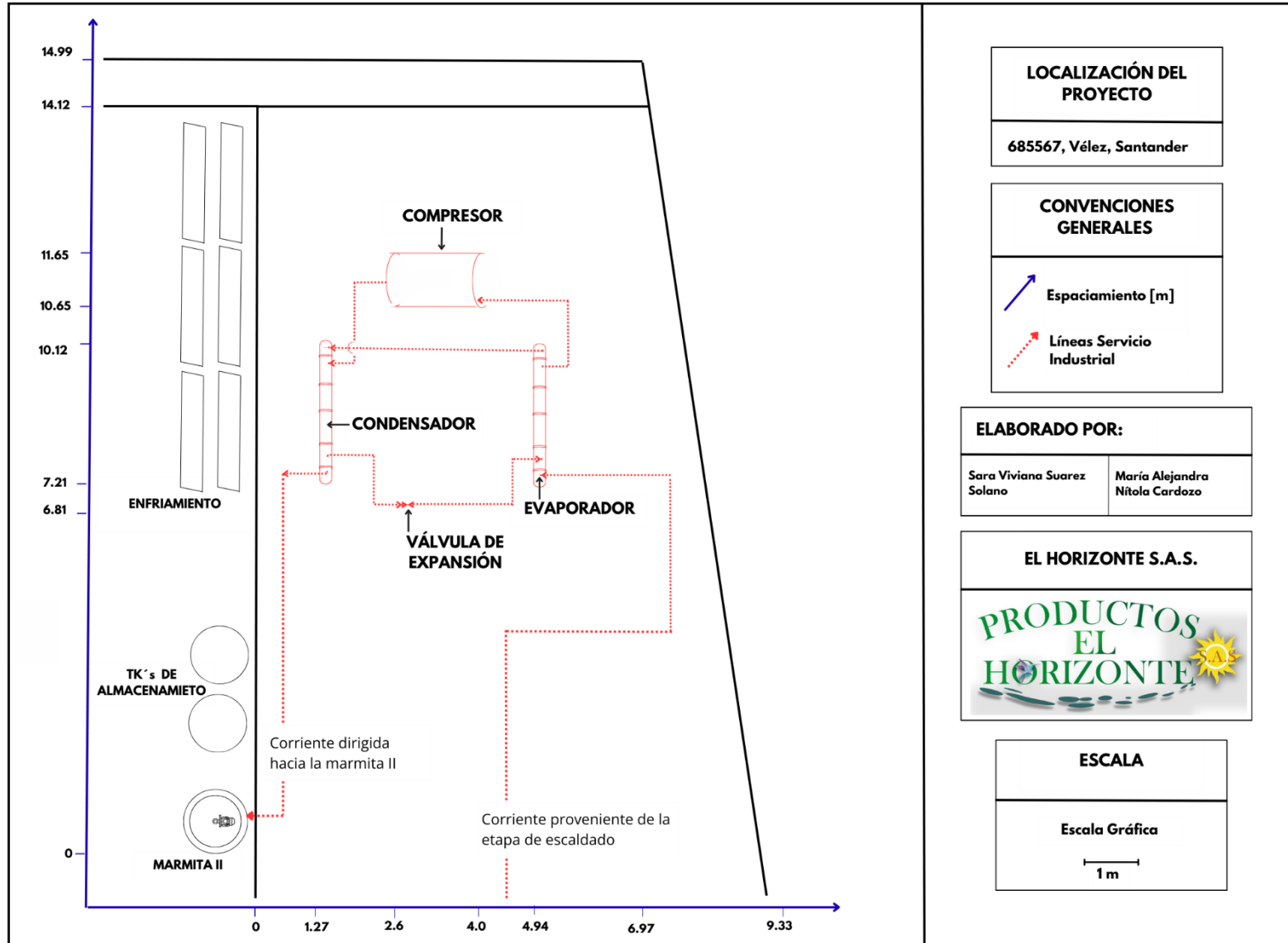
Plot Plan de la Planta de Producción (Alternativa 2)– El Horizonte S.A.S.



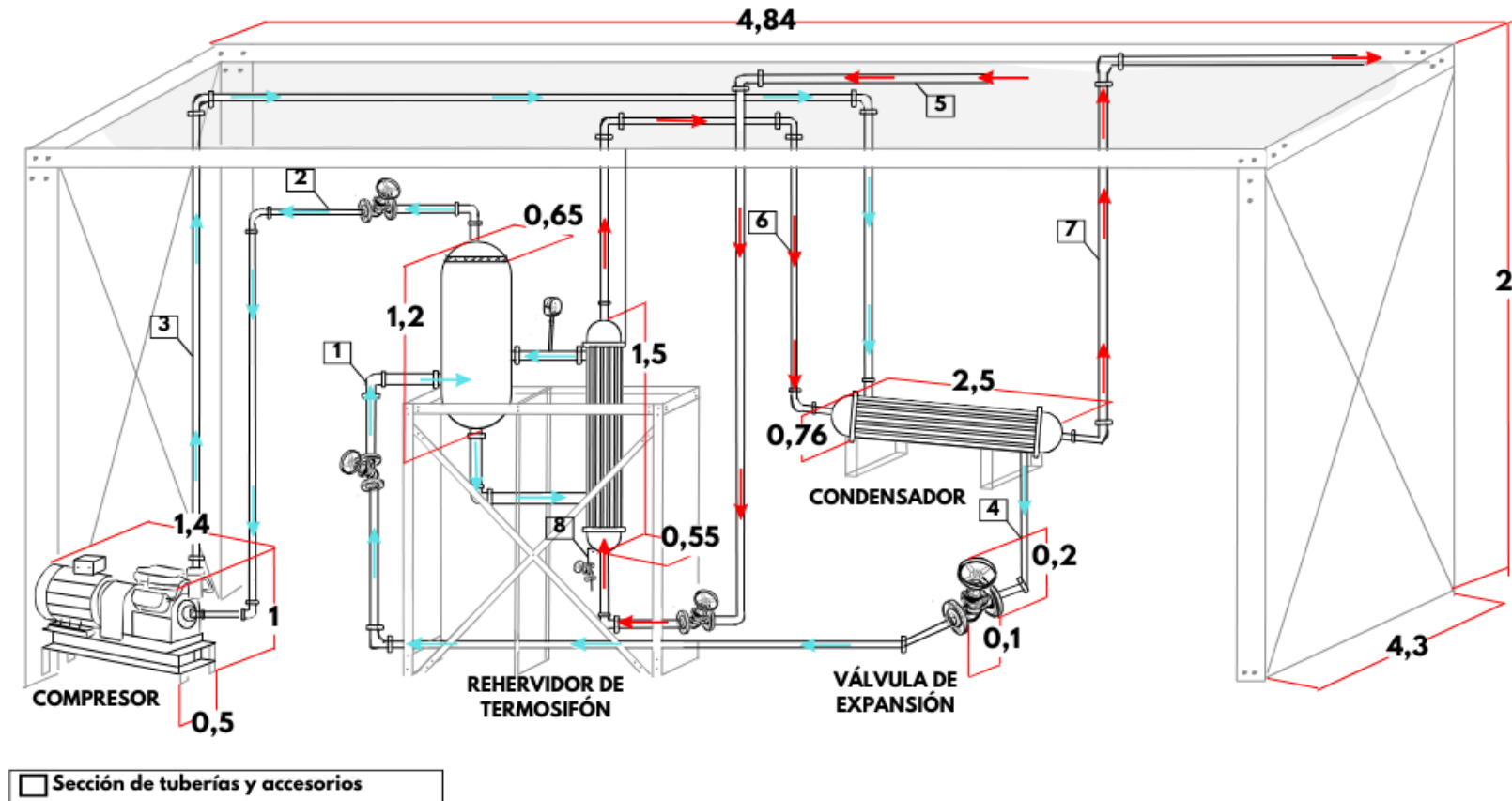
DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 15

Layout de la Planta de Producción (Alternativa 2) – El Horizonte S.A.S.



DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 16*Vista isométrica Bomba de Calor (Alternativa 2) – El Horizonte S.A.S.*

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

5.3.Evaluación de la Alternativa escogida con diferentes fluidos de trabajo

De la alternativa seleccionada, se evaluaron diferentes fluidos de trabajo mediante simulación en Aspen HYSYS para determinar las condiciones operativas y la viabilidad técnica del proceso. La selección del refrigerante consideró eficiencia térmica, compatibilidad ambiental (GWP; el potencial de calentamiento global y ODP; potencial de agotamiento de la capa de ozono), así como seguridad, eficiencia y disponibilidad (NAMA Facility, 2020). Los refrigerantes analizados se clasificaron en halogenados, orgánicos e inorgánicos, priorizando aquellos con menores valores de GWP y ODP, mayor disponibilidad y perfil de seguridad favorable. Entre los halogenados se incluyeron R113 (CFC), R21 (HCFC) y R134a (HFC); entre los orgánicos, R290 (propano) y R1270 (propileno); y entre los inorgánicos, agua (R-718) y amoníaco (R-717) (Arpagaus, et al., 2018).

La Tabla 11 presenta los resultados de la evaluación de diferentes refrigerantes, considerando como referencia la cantidad de jalea de guayaba a procesar (3.051 kg) y presiones de operación entre 90 y 95 kPa, según los parámetros de diseño de la alternativa seleccionada. De los resultados, se descartan los refrigerantes R21, R113 y R134a por sus altos valores de ODP y GWP, mayor consumo energético y costos superiores, además de su limitada disponibilidad, en particular R21 y R113, cuyo comercio está regulado por el Protocolo de Montreal. Asimismo, de la Tabla 12 ilustra como los refrigerantes con valores nulos de GWP y ODP presentan menor consumo de masa debido a su mayor calor latente por unidad de masa, requieren menos energía en el compresor y tienen costos más bajos. Entre ellos, el agua (R-718) se identifica como la opción adecuada, al requerir la menor cantidad de masa, tener el costo más bajo, valores nulos de GWP y ODP, un COP dentro del rango esperado según estudios (Arpagaus, et al., 2018) y asegurar el menor consumo energético en el compresor.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Tabla 11*Rendimiento global del ciclo de la bomba de calor según el refrigerante*

Familia	Refrigerante	Calor latente [kJ/kg]	Masa [kg]	ΔT [°C]	Q_L [kJ]	Q_H [kJ]	W_{neto} [kJ]	COP_{HP}	GWP	ODP	\$COP/kg
HCFC	R21	238,1	843	20	39.760	54.830	15.060	3,64	148	0,04	50.000
CFC	R113	143,3	1410	20	39.500	54.560	15.060	3,62	5820	0,85	220.000
HFC	R134a	219,3	966,4	20	41.930	56.980	15.060	3,79	1300	0	180.000
HC	R290	426,7	444	20	37.400	52.500	15.000	3,50	3	0	45.000
	R1270	437,4	431	20	37.350	52.410	15.000	3,48	2	0	40.000
Naturales	R717	1397,9	172,5	22,3	48.020	64.670	16.650	3,88	0	0	16.000
	R718	2262,3	73	13,7	32.790	43.070	10.280	4,19	0	0	153,75

Nota. ΔT representa la elevación de temperatura del vapor recuperado; Q_L y Q_H corresponden al calor intercambiado en el evaporador y en el condensador, respectivamente; W_{neto} es la energía consumida por el compresor; COP es el coeficiente de desempeño de la bomba de calor. Los valores de GWP (potencial de calentamiento global) y ODP (potencial de agotamiento de la capa de ozono) fueron tomados de (Arpagaus, et al., 2018).

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

En consecuencia, y dando respuesta a la pregunta de investigación, la Alternativa 2 se ajusta a las condiciones operativas de la industria El Horizonte S.A.S., al aprovechar el vapor residual del proceso de escaldado como fuente térmica para la bomba de calor, optimizando la transferencia de energía. Esta alternativa presenta un desempeño técnico y económico adecuado a las necesidades de la empresa, contribuyendo al incremento de la producción bajo criterios de eficiencia energética y sostenibilidad.

El aporte que se obtendría con la implementación de los resultados del presente documento se manifiesta no solo en el aprovechamiento energético, sino también en el fortalecimiento del impacto social asociado a la propuesta. La ejecución del proyecto contempla la inclusión de población vulnerable y minorías en las etapas de instalación, operación y mantenimiento del sistema, lo que asegura la generación de oportunidades de empleo digno y el fortalecimiento del capital humano local. Este enfoque permite articular la innovación tecnológica con un compromiso ético hacia la equidad social, contribuyendo al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) al promover un sistema más sostenible, ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) mediante la creación de empleos de calidad, y ODS 10 (Reducción de las desigualdades) a través de la inclusión activa de sectores tradicionalmente marginados en la dinámica productiva. De esta manera, el proyecto trasciende el ámbito técnico-industrial y se consolida como una iniciativa integral de carácter sostenible y socialmente responsable.

6. Conclusiones

- El diseño de la bomba de calor establece un aumento de 1.709,6 kg de bocadillo por lote, resultante del aprovechamiento de 33.685,9 kJ por lote derivado del flujo residual generado en el escaldado en la industria del bocadillo El Horizonte S.A.S., ubicada en la provincia de Vélez, Santander.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

- Del análisis del diagrama de bloques (BFD), los datos de operación y los balances de masa y energía, es posible identificar como fuentes de calor residual al vapor remanente de la chaqueta del proceso de escaldado y los gases de chimenea generados en la caldera.
- La evaluación de las dos alternativas planteadas presenta diferentes desempeños, donde la Alternativa 1 presenta un COP de 4,56, un consumo energético en el compresor de 14,1 kW y una transferencia de calor a la marmita de 231.257,7 kJ por lote. En contraste, la Alternativa 2 mostró un COP de 4,18, un consumo en el compresor de 2,94 kW y una transferencia de calor a la marmita de 360.727,06 kJ por lote. Destacando la Alternativa 2, por entregar mayor cantidad de energía útil con un menor consumo eléctrico, lo que se traduce en un aumento de las ganancias por lote de \$5.129.284,4, con un CAPEX estimado de \$ 71.971.370,40 y un OPEX de \$ 3.329,1 por lote. Por lo cual, la Alternativa 2 fue seleccionada como la opción más factible para la implementación del diseño de la bomba de calor
- De la evaluación de diferentes fluidos de trabajo en la Alternativa 2, se obtuvo que el agua y el amoníaco fueron los que presentaron el mejor desempeño energético, con entregas de energía de 2.262,3 kJ/kg y 1.397,9 kJ/kg, respectivamente. Asimismo, mostraron coeficientes de desempeño (COP) de 4,19 para el agua y 3,88 para el amoníaco, con el menor impacto ambiental, al presentar valores nulos de Potencial de Calentamiento Global (GWP) y Potencial de Destrucción de la capa de Ozono (ODP). Por lo cual, el agua corresponde a el fluido de trabajo más favorable, dado a su menor costo \$153,17 por kg y su mayor eficiencia energética por unidad de masa, lo que la convierte en la opción factible para el diseño de la bomba de calor.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

7. Recomendaciones

- Realizar un análisis de flujo de caja que incorpore todas las variables económicas relevantes, con el fin de determinar si la alternativa seleccionada mantiene un desempeño satisfactorio a largo plazo bajo las condiciones previamente establecidas.
- De acuerdo con el desarrollo del proyecto, se recomienda iniciar el diseño detallado de la planta con bomba de calor, con el fin de contar con la información necesaria para su construcción, montaje, puesta en marcha y operación. Este diseño debe incluir los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID), la especificación completa de equipos y materiales, el diseño estructural, de redes eléctricas, así como la implementación de lazos de control automáticos que permitan regular de forma segura las variables críticas del proceso
- Los resultados del presente trabajo deberán revisarse en conjunto con la empresa El Horizonte S.A.S., con el propósito de validar la viabilidad del proyecto y contrastar la precisión de los datos teóricos frente a los reales de la producción de bocadillo. En caso de identificarse discrepancias entre ambos, se recomienda ajustar el diseño para alinearlos con las condiciones actuales de la producción.
- Este estudio busca ser un punto de partida para futuras investigaciones relacionadas con el diseño de bombas de calor aplicadas a la industria de alimentos. Se sugiere replicar la metodología en otros sectores con diferentes requerimientos térmicos, a fin de evaluar las adaptaciones necesarias en el diseño según las características y demandas específicas de cada proceso.
- Finalmente, se identificaron oportunidades de mejora en materia de seguridad, las cuales fueron comunicadas a la empresa, especialmente en lo referente al uso adecuado de elementos de protección personal por parte de los trabajadores.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Referencias Bibliográficas

- Arpagaus C., 2016. *High temperature heat pump using HFO and HCFO refrigerants-system design and experimental results*. s.l.:s.n.
- 360, C., n.d. *Información empresarial de Colombia*. [Online]
Available at: <https://www.compite360.com/sitio/CIAdnMetrica/>. [Último acceso: 17 09 2024].
[Accessed 17 09 2024].
- Arpagaus, C. et al., 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy (Oxford)*, 152, 985–1010..
- Bahamondes, J., 2008. *Diseño y construcción de un separador ciclónico para la industria naval*. [Online]
Available at: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfcib151d/doc/bmfcib151d.pdf>
- Camposeco A et, 2021. *Dimensionamiento de una bomba de calor para aprovechamiento de calor residual en los procesos convencionales de la industria guatemalteca y su utilización de baja entalpía*.. Guatemala: s.n.
- Cengel, Y., 2009. *Termodinámica*. Sexta ed. Mexico D.F: Mc Graw-Hill.
- Comisión Española de la Contrucción , 2011. *Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.. [Online]
Available at: <https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-cedex/NR/B01FDCCB-AC8E-4089-9699-FA6413FBEE7C/119905/CENIZASVOLANTESDECARBONYCENIZASDEHOGAR.pdf>
- DIAN, 2021. *Comunicado de prensa No. 153: Tenga en cuenta las nuevas disposiciones sobre tráfico postal y envíos urgentes*. [Online]
Available at: https://www.dian.gov.co/Prensa/Paginas/NG-Comunicado-de-Prensa-153-2021.aspx?utm_source=chatgpt.com
- Dumont , M. et al., n.d. *The techno-economic integrability of high-temperature heat pumps for decarbonizing process heat in the food and beverages industry*. [Online]
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106605>
- ECODES, 2020. *Alimentación y emisiones de CO2, análisis de impactos climáticos*. [Online]
Available at: <https://ecodes.org/hacemos/cambio-climatico/mitigacion/alimentacion-y-emisiones-de-co2-analisis-de-impactos-climaticos>
[Accessed 11 09 2024].
- Felbab, N., 2013. *Condensation of saturated vapours on compression and estimation of minimum suction superheating*. *Applied Thermal Engineering*, 52(2). [Online]
Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.12.026>
- García Arbeláez , C., Vallejo, G., Higgings , M. & Escobar, E., 2016. *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático*, Cali, Colombia. 52 pp.: 1 ed. WWF-Colombia..
- IDEAM, 2022. *Indorme del inventario nacional de gases efecto invernadero 1990-2018 y carbono negro 2010-2018 de Colombia*. [Online]
Available at: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Annex%20BUR3%20COLOMBIA.pdf>.
[Accessed 20 09 2024].

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Kelly, F. T., n.d. *Bombas de Calor Aplicaciones Industriales*. s.l.:THERMAL ENGINEERING LTDA.

Kondou et, 2014. *ELSEVIER*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.018>

[Accessed 28 08 2024].

Madani, H., Ahmadi, N., Claesson, J. & Lundqvist, P., 2010. *Análisis experimental de un sistema de bomba de calor de capacidad variable, centrado en el comportamiento de pérdidas del compresor y del inversor. Conferencia Internacional de Refrigeración y Aire Acondicionado*. [Online]

Available at: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1063>

Ministerio del Trabajo de Colombia, 1979. *Resolución 2400 de 1979* .. [Online]

Available at: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=53565>

NAMA Facility, 2020. *Estudio De Mercado Bombas de calor Geotérmicas y Aerotérmicas en Chile*. Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale.

Perry, R. H., Green, D. W. & Maloney, J. O., 2001. *Manual del ingeniero químico de Perry (7.ª ed., Vols. 1–2)*. s.l.:McGraw-Hill Interamericana.

Pinzón, C. & Pérez, J., 2021. *CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN, UN RESIDUO DE LA*. [Online]

Available at:

http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/8579/1/Pinz%C3%B3n_P%C3%A9rez_2021_TG.pdf

Prada Forero, L. E., García Bernal, H. R., Koop Sanabria, E. & Cáceres Ríos, J. J., 2005. *Bijao: Un empaque para la certificación de origen del bocadillo veleño*. [Online]

Available at:

https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1978/41525_41486.pdf?utm_source=chatgpt.com

Ray, S. & Das, G., 2020. *Process equipment and plant design: principles and practices. Ghent University Library*. [Online]

Available at: <https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:4100000011277423>.

Rodriguez, E. & Bastidas, P., 2009. *Scielo*. [Online]

Available at: <http://www.scielo.org.co/img/revistas/iei/v29n2/v29n2a05.pdf>

Sarmiento, S. S., 2020. *Estado del arte de bombas de calor de alta temperatura para aplicaciones industriales*. Sevilla: Trabajo Fin de grado Ingeniería de Tecnologías Industriales.

Schlosser, F. et al., 2020. *ScieceDirect*. [Online]

Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110219>

Smith, R., 2016. *Diseño e integración de procesos químicos (2.ª ed.)*. s.l.:John Wiley & Sons Inc..

Tello Oquendo, F. M., López Romero, B. A., Vásconez Núñez, D. C. & Miño Cascante, G. E., n.d. *Rendimiento de bombas de calor con ciclo de compresión de simple etapa y ciclo de compresión*

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

- de doble etapa con inyección de vapor para producción de agua caliente sanitaria.* [Online]
Available at: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000100215>
- Tello-Oquendo, F. M., López-Romero, B. A., Vásconez-Núñez, D. C. & Miño-Cascante, G. E., n.d.
Rendimiento de bombas de calor con ciclo de compresión de simple etapa y ciclo de compresión de doble etapa con inyección de vapor para producción de agua caliente sanitaria. [Online]
Available at: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000100215>
- Towler , G. P. & Sinott, R. K., 2013. *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (2ª ed.)*. s.l.:Butterworth-Heinemann.
- Unidas, N., n.d. *Objetivos de Desarrollo Sostenible.* [Online]
Available at: <https://colombia.un.org/es/sdgs>
[Accessed 13 09 2024].
- Valencia , A., 2015. *DIRECCION DE CADENAS PRODUCTIVAS.* [Online]
Available at: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Guayaba/Documentos/2015-07-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Wemmers AK, v. H. A. K. P. v. d. K. J., 2017. *Test results R600 pilot heat pump..* s.l.:s.n.

Apéndice

1. Balance de Masa

la caracterización de las corrientes del proceso se lleva a cabo mediante balances de masa, aplicando la Ecuación 2, con el fin de determinar los flujos másicos tanto por compuesto como de manera global en cada corriente. Adicionalmente, se registra la temperatura y presión, lo que permite describir las condiciones de las corrientes en cada etapa del proceso y los servicios industriales.

$$\sum \dot{m}_{entra} - \sum \dot{m}_{salida} + \sum \dot{m}_{genera} - \sum \dot{m}_{consume} = \frac{dM}{dt} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde, \dot{m}_{entra} corresponde al flujo másico que ingresa al sistema, \dot{m}_{salida} representa el flujo másico que egresa al sistema. Adicionalmente, \dot{m}_{genera} hace referencia a la masa generada dentro del sistema como resultado de reacciones químicas, y $\dot{m}_{consume}$ a la masa consumida en dichas reacciones. Finalmente, el término $\frac{dM}{dt}$ expresa la acumulación de masa en el sistema por unidad de tiempo.

Para la realización de los balances de masa del proceso se elaboraron tanto balances por equipos como un balance global, considerando las especificaciones técnicas y la información suministrada por la empresa.

En la etapa de selección, se descarta aproximadamente el 10,8 % de la fruta ingresada por presentar un bajo grado de maduración. Posteriormente, durante el lavado y desinfección, se emplea una solución compuesta por 0,0491 % v/v de n-Alquil Dimetil Bencil Cloruro de Amonio,

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

0,0491 % v/v de Di-(C8-10) Alquil Dimetil Cloruro de Amonio y 0,393 % v/v de excipientes del desinfectante, diluidos en 99,5 % v/v de agua.

La guayaba desinfectada se somete al escaldado, donde se utiliza aproximadamente el 30 % del vapor generado en la caldera. En esta operación se adiciona agua en una cantidad equivalente al 78,6 % del peso de la guayaba a escaldar. Como resultado, se obtiene una mezcla de agua con restos de pulpa, cáscara y semillas (corriente 10), correspondiente al 25 % del agua ingresada al proceso, la guayaba escaldada (corriente 12) y vapor generado por calentamiento (corriente 11), equivalente al 75 % del agua ingresada

El producto pasa luego al despulpado y refinado, donde se generan aproximadamente 50 kg de residuos por cada 45 canastillas de fruta, considerando que cada canastilla tiene un peso de 30 kg. Posteriormente, en la cocción de la jalea, se emplea cerca del 70 % del vapor producido por la caldera. Durante esta operación, a la marmita ingresan agua en una proporción del 5 % respecto a la jalea producida, además de la adición de azúcar.

Posteriormente, tras el proceso de secado y extendido, el corte genera residuos equivalentes a un 2 % del producto elaborado. Finalmente, el bocadillo se empaca en hoja de bijao, utilizando en promedio una unidad de hoja por cada pieza individual de aproximadamente 23 g. Según la fuente consultada, una libra de hoja de bijao rinde para elaborar cerca de 720 empaques individuales (Prada Forero, et al., 2005). Los datos generados de los balances se presentan en la tabla 1

1.1.Balance Global

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

$$\begin{aligned}
 & F1 + F4 + Fa + Fb + F8 + F19 + F20 + F28 + Fc \\
 = & F2 + F6 + F9 + F10 + F11 + F13 + F15 + F16 + Fd + F22 + F24 + F26 \\
 & + F29
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3}$$

1.2. Balance Tanque de Selección

$$F1 = F2 + F3 \tag{Ec. 4}$$

1.3. Balance Lavado

$$F3 + F4 = F6 + F5 \tag{Ec. 5}$$

1.4. Balance Escaldado

$$F5 + F8 = F10 + F11 + F12 \tag{Ec. 6}$$

1.4.1. Balance Escaldado Servicio Industrial

$$F7 = F9 \tag{Ec. 7}$$

1.5. Balance Secado

$$F12 = F13 + F14 \tag{Ec. 8}$$

1.6. Balance Despulpado y Refinado

$$F14 = F15 + F16 + F17 \tag{Ec. 9}$$

1.7. Balance Marmita

$$F17 + F19 + F20 = F22 + F23 \tag{Ec. 10}$$

1.7.1. Balance Marmita Servicio Industrial

$$F18 = F21 \tag{Ec. 11}$$

1.8. Balance Secado y Extendido

$$F23 = F24 + F25 \tag{Ec. 12}$$

1.9. Balance Cortado

$$F25 = F26 + F27 \tag{Ec. 13}$$

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

1.10. Balance en Empaque

$$F27 + F28 = F29 \quad (\text{Ec. 14})$$

1.11. Balance Caldera

$$F_e + F_b + F_c = F_f + F_d \quad (\text{Ec. 15})$$

2. Balance de Energía

Los balances de energía en los equipos que intervienen en la transferencia de calor, específicamente en el escaldado, la marmita y la caldera. Estos balances se formularon con base en la Primera Ley de la Termodinámica para sistemas abiertos, estableciendo que el calor transferido por el vapor equivale al calor absorbido por las mezclas en cada operación unitaria. Para su desarrollo se aplicaron las ecuaciones correspondientes (Ecuación 16), ajustadas a cada equipo según sus condiciones de operación, flujos másicos y calores específicos de las materias primas involucradas.

$$Q_{\text{transferido}} = Q_{\text{recibido}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde, $Q_{\text{transferido}}$ representa la cantidad de calor cedida por el sistema y el Q_{recibido} la cantidad de calor absorbida por el sistema receptor.

2.1. Balance Caldera

El calor transferido en la caldera se determina a partir del flujo másico y de las entalpías del agua (corriente e), de acuerdo con la Ecuación 17.

$$Q_{\text{caldera}} = \dot{m}_{\text{agua}} (h_{s, \text{vapor}} - h_{e, \text{vapor}}) \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde, \dot{m}_{agua} corresponde al flujo másico del agua en kg ; $h_{s, \text{vapor}}$ y $h_{e, \text{vapor}}$ representan las entalpías de salida (130,6°C) y entrada del proceso (57,8 °C) en kJ/kg, obtenidas

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

de tablas de propiedades térmicas (Cengel, 2009), Se obtiene un valor de calor transferido en la caldera de 2.973.480,00 kJ/lote.

2.1.1. Balances de Energía Gases de chimenea

El calor transferido por los gases de chimenea se estima considerando la eficiencia de la caldera (70%), A partir de lo anterior, se calcula el calor total generado en la combustión, según la ecuación 18.

$$Q_{\text{combustión}} = \frac{Q_{\text{agua}}}{\eta} \quad (\text{Ec. 18})$$

La diferencia entre este valor y el calor realmente aprovechado para calentar el agua representa la pérdida de energía a través de los gases, que en este caso equivale aproximadamente a 1.274,3 kJ/lote, valor que se transfiere a la bomba de calor,

2.2. Balance en Escaldado

El calor transferido en el escaldado se determina a partir del flujo másico de la mezcla de Guayaba (Corriente 5) y agua (Corriente 8), de acuerdo con la Ecuación 3, Donde, el calor transferido corresponde al vapor de agua (Corriente 7) y el calor recibido a la mezcla en el escaldado (Corrientes 5 y 8), En consecuencia, el calor de la mezcla equivale al calor del vapor de agua y se determina mediante la Ecuación 19.

$$Q_{\text{agua}} = \dot{m}_{\text{mezcla}} * C_{p\text{mezcla}} (T_{s, \text{mezcla}} - T_{e, \text{mezcla}}) \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde, \dot{m}_{mezcla} corresponde al flujo másico de la fruta (Corriente 5) y el agua (Corriente 8) en kg, $C_{p\text{mezcla}}$ al calor específico de la mezcla (3,59 kJ/kg·°C) y $T_{s, \text{fruta}}$ y $T_{e, \text{fruta}}$ a las temperaturas de salida (93,5°C) y entrada del proceso (22°C). El valor de C_p utilizado (3,59

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

$\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) se adopta como referencia del calor específico de la fruta, con base en tablas de propiedades térmicas reportadas para alimentos de composición similar (Cengel, 2009), Se obtiene un valor de calor transferido en el escaldado de 834570 kJ/lote.

2.3.Balance Marmita

El calor transferido en la marmita se determina a partir del flujo másico de la mezcla de pulpa de Guayaba (Corriente 17), azúcar (Corriente 20) y agua (Corriente 19), de acuerdo con la Ecuación 3, Siendo el calor de la mezcla equivale al calor del vapor de agua, que se determina mediante la Ecuación 19.

Donde, $C_{pmezcla}$ corresponde al calor específico de la mezcla ($2,4 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), mientras que $T_{s,mezcla}$ y $T_{e,mezcla}$ representan las temperaturas de salida y entrada del proceso. El valor de C_p utilizado, de aproximadamente $2,4 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$, se adopta como una estimación representativa del calor específico de la mezcla, basado en datos reportados para una especie de guayaba empleada en la producción de confite duro de arazá (Rodriguez & Bastidas, 2009). Por lo tanto, el calor transferido por la caldera es 468.633,6 kJ/lote.

2.3.1. Coeficiente global de transferencia de energía de la marmita

Se determinó el coeficiente global de transferencia de energía de la marmita, lo que permitió identificar la capacidad real de transferencia térmica del nuevo equipo adquirido por la empresa, por medio de la ecuación 20.

$$Q = U * A * \Delta T \quad (\text{Ec. 20})$$

A partir de los datos suministrados por la empresa, correspondientes a la marmita adquirida con un diámetro de carcasa de 1,1 m y una altura de 1,75 m, se estimó su geometría asimilándola a un

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

cilindro. Con esta aproximación, el área de intercambio se calculó mediante la ecuación $A = 2(\pi r^2) + 2\pi r^2 h$, donde r corresponde al radio y h a la altura del cilindro, obteniéndose un valor de 5,22 m². Posteriormente, el ΔT se determinó considerando la diferencia entre la temperatura de saturación del vapor de agua en la chaqueta y la temperatura de cocción de la jalea en el interior de la marmita. Con estos parámetros, se obtuvo un coeficiente global de transferencia de calor de 2562,09 kJ/hm²°C.

Tabla 12*Calor trasferido por Operación unitaria*

	Caldera	Marmita	Escaldado
Calor kJ/lote	2973480,0	468633,6	834570,0

3. Balance Económico

El Potencial Económico 2 (PE₂) se determina por medio de la Ecuación 21, a partir de los datos proporcionados por El Horizonte S.A.S. sobre los costos de materias primas, productos y subproductos consignados en la Tabla 13.

$$PE_2 = \text{Ingresos por producción} - \text{Egresos por costos de materias primas} \quad (\text{Ec. 21})$$

Tabla 13*Costos unitarios de insumos, producto y subproductos– El Horizonte S.A.S*

Categoría	Compuesto	Costo unitario (\$COP/kg)
Materias primas	Guayaba	1.066,6
	Azúcar	3.300,0
	Hoja de bijao	5.895,5
	Solución desinfectante a base de amonio	19.992,0
	Agua	153,8
Servicios Industrial	Carbón	300,0
	Agua	153,8
Subproductos/Residuos	Cáscaras y semillas	375,0
	Desperdicios de bocadillo	2.000,0
	Agua con desperdicios de fruta	99,8
Producto final	Bocadillo para distribución	7.083,3

3.1. Balance Económico El Horizonte S.A.S. – Base (operación actual)

El potencial económico de la empresa El Horizonte S.A.S. se evalúa a partir de las corrientes de entrada y salida del proceso, representadas en la Figura 3. A partir de este análisis se obtiene una ganancia de \$5,226,877,23, calculada con base en los costos de insumos, productos y subproductos presentados en la Tabla 13. Los cálculos correspondientes se detallan en la Tabla 14 y su determinación se realiza mediante la Ecuación 21.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Tabla 14*Balance económico de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo- El Horizonte S.A.S.*

Categoría	Compuesto	Corriente	Entrada (kg/lote)	Salida (kg/lote)	Egresos (\$COP/lote)	Ingresos (\$COP/lote)	Total (\$COP/lote)
Materias primas	Guayaba	1	2.040,6	-	2.176.626,7	-	7.170.170.17,4
	Solución desinfectante a base de Amonio	4	19,3	-	385.685,7	-	
	Agua para disolución de desinfectante	4	3.632,7	-	9.502,6	-	
	Azúcar	20	1.200,0	-	3.960,0	-	
	Hoja de Bijao	28	45,6	-	268.652,5	-	
	Agua	8 y 19	1.519,8	-	233,7	-	
Servicios Industrial	Carbón	b	150,00	-	45,0	-	
	Aire	c	1.716,00	-	-	-	
	Agua	a	36,0,00	-	55,3	-	
Subproductos/Residuos	Agua con trozos de fruta	10	-	357,6	35,7	-	12.199.104,6
	Vapor de agua (Proceso)	11	-	1.072,9	-	-	
	Vapor de agua (Proceso)	22	-	1.264,0	-	-	
	Vapor de agua (Chaqueta)	9	-	360	-	-	
	Gases de chimenea	d	-	1.866	-	-	
	Guayaba verde	2	-	220,6	-	-	
	Impurezas Guayaba y solución de amoniaco	6	-	3.652,1	-	-	
	Cáscaras y semillas	15 y 16	-	58	-	21.738,5	
	Desperdicio de bocadillo	26	-	34	-	67.918,4	
	Humedad del bocadillo	24	-	89,4	-	-	
Producto Final	Bocadillo para distribución	29	-	1.709,6	-	12.109.447,7	

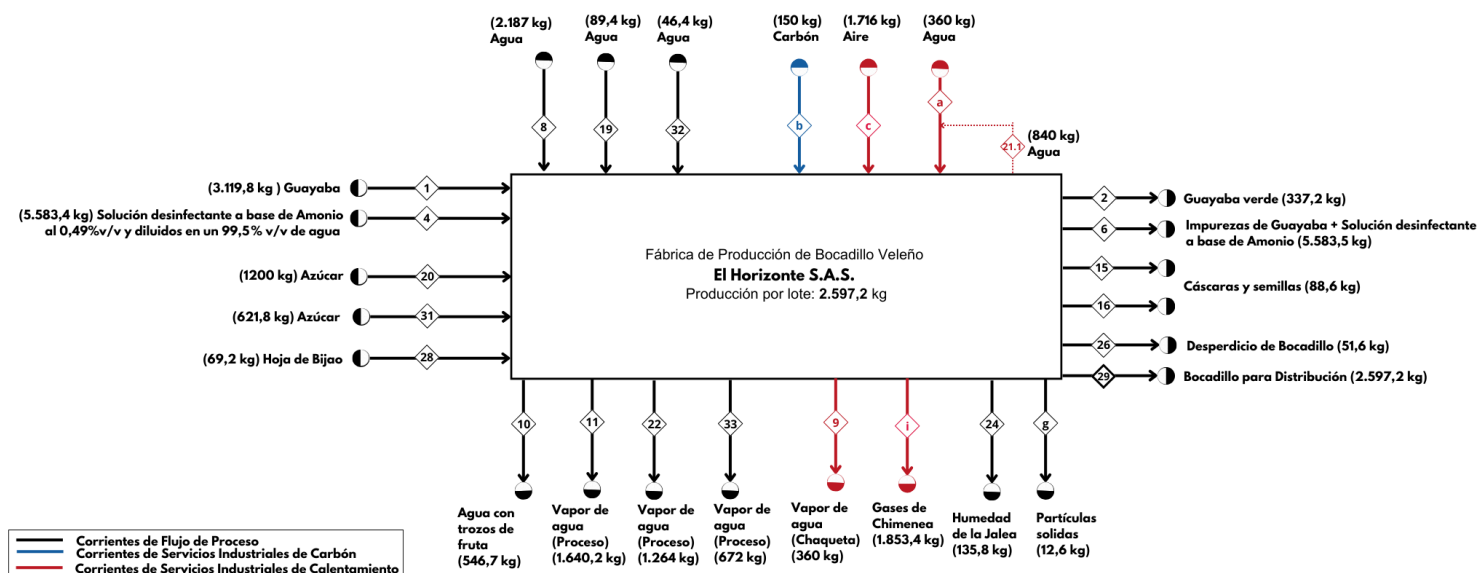
3.2. Balance Económico El Horizonte S.A.S- Alternativa 1.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

La Figura 17 representa el diagrama de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo en la planta El Horizonte S.A.S con la incorporación de la bomba de calor para la Alternativa 1.

Figura 17

Diagrama de Entradas y Salidas (E/S) del proceso de producción de Bocadillo, Alternativa 1– El Horizonte S.A.S.



En relación con lo anterior, se efectuó el balance de masa considerando las nuevas corrientes del sistema. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la Tabla 15, la cual corresponde al flujo másico de cada corriente. Este análisis se fundamenta en la Figura 17, que ilustra el diagrama BFD y en la Figura 18, que corresponde al diagrama PFD de la configuración de la bomba de calor implementada en la Alternativa 1.

En esta configuración, el sistema incluye un ciclón que separa las partículas sólidas generadas por la combustión del carbón. La empresa utiliza carbón bituminoso, el cual produce aproximadamente un 15% de ceniza en masa (Pinzón & Pérez, 2021). De esta cantidad, alrededor del 20% permanece dentro de la caldera como ceniza de fondo, mientras que el resto es

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

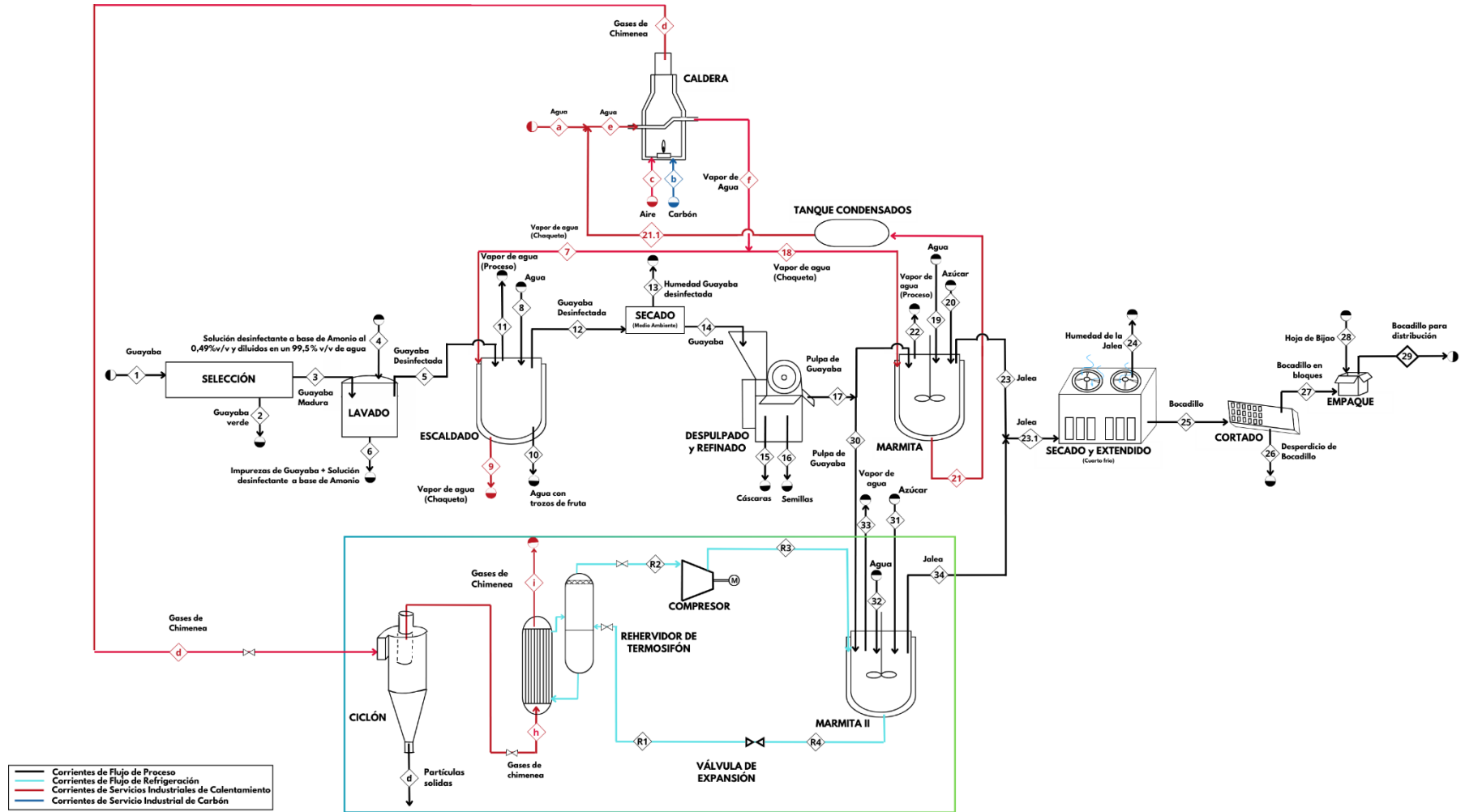
transportado por los gases de la chimenea en forma de ceniza volante (Comisión Española de la Contrucción , 2011).

El ciclón está diseñado para retener al menos el 70% de las partículas sólidas con un tamaño mínimo de 5 micras (Bahamondes, 2008). Esta eficiencia permite reducir la cantidad de partículas sólidas que llegan al intercambiador de calor de la bomba de calor.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 18

Diagrama de flujo del proceso con integración de bomba de calor Alternativa 1– El Horizonte S.A.S.



DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Flujo Residuos Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Azúcar [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Carbón [kg]	-	-	-	150	-	-	-	-	12,6
Flujo de Desinfectante [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Bocadillo en Bloque [kg]	672	928	-	-	-	-	-	1316	-
Flujo de Nitrógeno [kg]	-	-	-	-	1316	1316	-	-	-
Flujo de Oxígeno [kg]	-	-	-	-	400	-	-	-	-
Flujo de Dióxido de Carbono [kg]	-	-	-	-	-	550	-	550	-
Flujo Hoja de Bijao [Kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-

El potencial económico de la empresa El Horizonte S.A.S. con la Alternativa 1, se evalúa a partir de las corrientes de entrada y salida del proceso, representadas en la Figura 17. A partir de este análisis se obtiene una ganancia de \$7.669,313, calculada con base en los costos de insumos, productos y subproductos presentados en la Tabla 13. Los cálculos correspondientes se detallan en la Tabla 16 y su determinación se realiza mediante la Ecuación 21.

Tabla 16

Balance económico de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo, Alternativa 1- El Horizonte S.A.S.

Categoría	Compuesto	Corriente	Entrada (kg/lote)	Salida (kg/lote)	Egresos (\$COP)	Ingresos (\$COP/lote)	Total (\$COP/lote)
Materias primas	Guayaba	1	3.119,8		3.327.756,2	-	10.863.916,6
	Solución desinfectante a base de Amonio	4	29,5		589.659,2	-	
	Agua para disolución de desinfectante	4	5.553,9		14,528,2	-	
	Azúcar	20 y 31	1.821,8		6.011,8	-	
	Hoja de Bijao	28	69,2		408.140,0	-	
	Agua	8, 19 y 20	2322,8		357,129,5	-	
	Carbón	b	150		45,000	-	

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Servicios Industrial	Aire	c	1.716,00	-	-	-
	Agua	a	360	55.350,6	-	-
Subproductos/Residuos	Agua con trozos de fruta	10	546,8	54.545	-	-
	Vapor de agua (Proceso)	11	1.676,8	-	-	18.533.230,5
	Vapor de agua (Proceso)	22	1.264,0	-	-	-
	Vapor de agua (Proceso)	33	1.979,3	-	-	-
	Vapor de agua (Chaqueta)	9	360	-	-	-
	Gases de chimenea	j	1.866	-	-	-
	Guayaba verde	2	337,2	-	-	-
	Impurezas Guayaba y solución de amoníaco	6	5.583,5	-	-	-
	Cáscaras y semillas	15 y 16	88,6	-	-	33.2356
	Desperdicio de bocadillo	26	51,6	-	-	103.182,4
Humedad del bocadillo	24	135,8	-	-	-	
Producto Final	Bocadillo para distribución	29	2.597,2	-	-	18.396.812,6

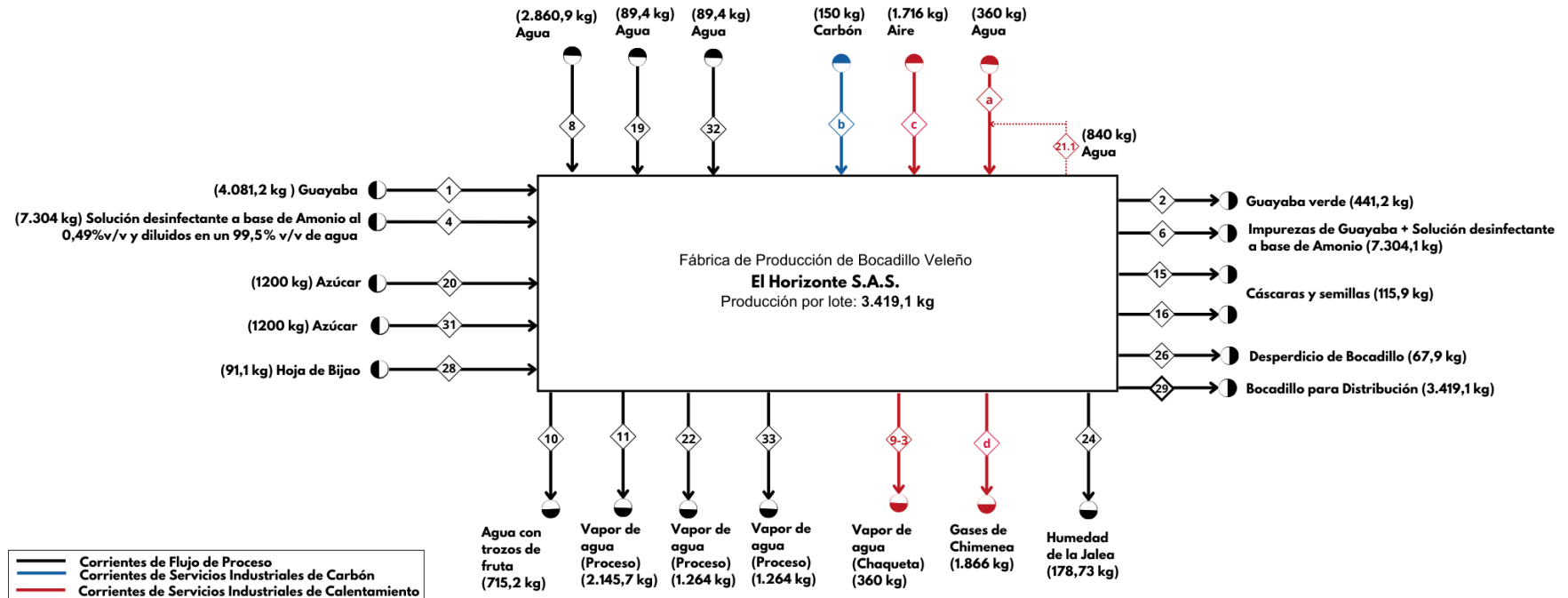
3.3. Balance Económico El Horizonte S.A.S.- Alternativa 2.

La Figura 19 representa el diagrama de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo en la planta El Horizonte S.A.S. con la incorporación de la bomba de calor para la Alternativa 2.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Figura 19

Diagrama de Entradas y Salidas (E/S) del proceso de producción de Bocadillo, Alternativa 2– El Horizonte S.A.S.



Por lo anterior, se efectuó el balance de masa considerando las nuevas corrientes del sistema. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la Tabla 17, la cual corresponde al flujo másico de cada corriente, Este análisis se fundamenta en la Figura 19, que ilustra el diagrama BFD y en la Figura 13, que corresponde al diagrama PFD de la configuración de la bomba de calor implementada en la Alternativa 2.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Flujo de Oxígeno [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Dióxido de Carbono [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Hoja de Bijao [Kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

	22	23	23,1	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Temperatura [°C]	93,5	86	86	-	22	22	22	22	22	22	22	22	93,5
Presión [kPa]	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Flujo Total [kg]	1264,02	1787,3	3574,6	178,7	3395,9	67,9	3328	91,1	3419,1	1761,9	1200	89,3	1264
Flujo de Agua [kg]	1264,02	-	-	-	-	-	-	-	3419,1	-	1200	89,3	1264
Flujo de Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Pulpa de Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Residuos Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Azúcar [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1761,9	-	-	-
Flujo de Carbón [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Desinfectante [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Bocado en Bloque [kg]	-	1787,3	3574,6	178,7	3395,9	67,9	3328	-	-	-	-	-	-
Flujo de Nitrógeno [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Oxígeno [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Dióxido de Carbono [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Hoja de Bijao [Kg]	-	-	-	-	-	-	-	91,1	-	-	-	-	-

	34	a	b	c	d	e	f
Temperatura [°C]	86	22	22	22	200	57,8	130,6
Presión [kPa]	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
Flujo Total [kg]	1787,3	360	150	1716	1866	1200	1200
Flujo de Agua [kg]	-	360	-	-	-	1200	1200
Flujo de Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Pulpa de Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-
Flujo Residuos Guayaba [kg]	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Azúcar [kg]	-	-	-	-	-	-	-
Flujo de Carbón [kg]	-	-	150	-	-	-	-
Flujo de Desinfectante [kg]	-	-	-	-	-	-	-

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Flujo de Bocadillo en Bloque [kg]	1787,3	-	-	-	-	-	-
Flujo de Nitrógeno [kg]	-	-	-	1316	1316	-	-
Flujo de Oxígeno [kg]	-	-	-	400	-	-	-
Flujo de Dióxido de Carbono [kg]	-	-	-	-	550	-	-
Flujo Hoja de Bijao [Kg]	-	-	-	-	-	-	-

El potencial económico de la empresa El Horizonte S.A.S. se evalúa a partir de las corrientes de entrada y salida del proceso, representadas en la Figura 3. A partir de este análisis se obtiene una ganancia de \$10.598.754,5, calculada con base en los costos de insumos, productos y subproductos presentados en la Tabla 13. Los cálculos correspondientes se detallan en la Tabla 18 y su determinación se realiza mediante la Ecuación 21.

Tabla 18

Balance económico de entradas y salidas del proceso de producción de bocadillo, Alternativa 2- El Horizonte S.A.S.

Categoría	Compuesto	Corriente	Entrada (kg/lote)	Salida (kg/lote)	Egresos (\$COP)	Ingresos (\$COP/lote)	Total (\$COP/lote)
Materias primas	Guayaba	1	4.081,2	-	4.353.253,3	-	14.239.990,3
	Solución desinfectante a base de Amonio	4	38,6	-	771.371,3	-	
	Agua para disolución de desinfectante	4	7.265,4	-	19.005,3	-	
	Azúcar	20 y 31	2.400	-	7.920.000,0	-	
	Hoja de Bijao	28	91,1	-	537.305,05	-	
	Agua para Escaldado	8, 19, 32	3.039	-	467.352,9	-	
Servicios Industrial	Carbón	b	150	-	45.000,00	-	
	Aire	c	1.716	-	-	-	
	Agua	a	360	-	55,3	-	
Subproductos/Residuos	Agua con trozos de fruta	10	-	715,2	71,3	-	
	Vapor de agua (Proceso)	11	-	2.145,7	-	-	
	Vapor de agua (Proceso)	22	-	1.264,02	-	-	
	Vapor de agua (Proceso)	33	-	1.264,02	-	-	
	Vapor de agua (Chaqueta)	9,3	-	360	-	-	
	Gases de chimenea	d	-	1.866	-	-	

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

	Guayaba verde	2	-	441,2	-	-
	Impurezas Guayaba y solución de amoniaco	6	-	7.304,1	-	-
	Cáscaras y semillas	15 y 16	-	115,9	-	43.477,07
	Desperdicio de bocadillo	26	-	67,9	-	135.836,7
	Humedad del bocadillo	24	-	17,8,7	-	-
Producto Final	Bocadillo para distribución	29	-	3.419,1	-	24.218.895,3

3.4. Análisis CAPEX-Alternativa 1

El cálculo de los gastos de capital se realiza a partir del costo de los equipos principales involucrados en la bomba de calor, en este caso: ciclón, rehervidor de termosifón, válvula de expansión, tanque de almacenamiento y bomba. Dicho costo se estima mediante la ecuación 22.

$$\text{CAPEX} = \text{CAPEX}_{\text{instalación}} + \text{CAPEX}_{\text{traslado}} \quad (\text{Ec. 22})$$

En primera instancia, es indispensable conocer el precio base de los equipos, Para ello, se efectuó una búsqueda en Alibaba considerando las características de diseño. Los precios reportados están expresados en dólares estadounidenses, por lo que se aplicó una tasa de cambio promedio de 4.152 COP/USD.

Cabe resaltar que los valores obtenidos corresponden únicamente al precio de compra de los equipos. No obstante, para determinar los gastos de capital es necesario calcular el costo total de cada equipo, el cual incluye también los costos de instalación, Este cálculo se desarrolla empleando la Tabla 19 y la ecuación 23 (Towler & Sinott, 2013).

$$\text{CAPEX}_{\text{instalación}} = C_e \left[(1 + f_p) f_m + (f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_l) \right] \quad (\text{Ec. 23})$$

Tabla 19

Corrección factor de instalación

Factor de instalación	
Montaje de equipos, f_{er}	0,3
Tuberías, f_p	0,8
Instrumentación y control, f_i	0,3
Eléctrico, f_{el}	0,2
Civil, f_c	0,3
Estructuras y edificios, f_s	0,2
Revestimiento y pintura, f_l	0,1

Nota. Tomado de Chemical Engineering Design (Towler & Sinott, 2013)

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

El factor de instalación (f_m), descrito en la ecuación, hace referencia a la relación entre el costo de un material distinto al acero al carbón y el costo del acero al carbón, según lo indicado en la Tabla 20 (Towler & Sinott, 2013).

Tabla 20*Factor costo de un material*

Acero al Carbón	1
Aluminio y bronce	1,07
Acero fundido	1,1
Acero inoxidable 304	1,3
Acero inoxidable 316	1,3
Acero inoxidable 321	1,5
Hastelloy C	1,55
Monel	1,65
Níquel	1,7

Asimismo, es indispensable determinar el costo de traslado de los equipos desde su país de origen hasta el municipio de Vélez, Santander. Esta estimación incluyó el transporte interno en el país de origen, el transporte internacional, el transporte dentro del país de destino, así como los impuestos asociados a la exportación e importación, entre ellos el IVA del 19% (DIAN, 2021).

Dado que los equipos adquiridos en Alibaba provienen de empresas fabricantes ubicadas en China, se consideró inicialmente el transporte por tren dentro del país de origen, Posteriormente, se calculó el costo del envío marítimo hasta el puerto de Buenaventura, Colombia, y finalmente se estimaron los gastos de transporte terrestre desde dicho puerto hasta el municipio de Vélez, Santander.

Tabla 21*Calculo gastos de Capital (CAPEX) para Equipos por Alternativa*

Alternativa	Equipo	CAPEX [\$COP]	CAPEX instalación [\$COP]	CAPEX traslado [\$COP]	CAPEX Total [\$COP]
1	Compresor	5.812.800,0	18.600.960,0	1.549.039,3	20.149.999,3
	Evaporador	12.456.000,0	46.585.440,0	2.880.218,3	49.465.658,3
	Válvula de expansión	747.360,0	2.526.076,8	195.849,5	2.721.26,3
	Ciclón	2.200.560,0	7.437.892,8	1.789.441,2	9.227.334,05

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

2	Compresor	2.200.560,00	7.041.792,00	546.513,90	7.588.305,90	71.913.370,4
	Evaporador	7.162.200,00	26.786.628,00	1.874.396,34	28.661.024,34	
	Válvula de expansión	747.360,00	2.526.076,80	195.849,48	2.721.926,28	
	Condensador	8.304.000,00	31.056.960,00	1.943.153,89	33.000.113,89	

4. Requerimientos de tuberías y accesorios.

Los requerimientos de cada serie de tuberías y accesorios de la bomba de calor se establecen a partir de consideraciones heurísticas. En primera instancia, el diámetro externo de la tubería se calcula mediante la ecuación 24, la cual se fundamenta en las heurísticas de diseño para tuberías de acero al carbono A106 propuestas por (Towler & Sinott, 2013), utilizadas como referencia para la selección de materiales en el sistema.

$$D_{\text{optimo}} = 0,664 D^2 - \rho^{-0,36} \quad (\text{Ec. 24})$$

Asimismo, la longitud de las tuberías se determinó en función del espaciamiento definido por la empresa, considerando la ubicación de los equipos mostrados en el diagrama de distribución (*Layout*), Figura 15. La codificación de cada línea se realizó de acuerdo con la norma ISA (*Instrument Society of America*), la cual establece una estructura estandarizada de identificación:

- Campos 1 a 2: diámetro nominal de la tubería.
- Campos 3 a 4: código de servicio industrial, siendo:
 - ✓ NR para refrigerante
 - ✓ UW para agua de servicio (proveniente del suministro de vapor de servicio industrial de la planta)
 - ✓ WC para condensado generado por el agua de servicio.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

- Campos 5 a 6: código de planta y área, los cuales se designaron con valor 0 debido a que la instalación no contempla esta diferenciación.
- Campos 7 a 9: número consecutivo correspondiente al serial de la línea o equipo asociado (por ejemplo, bomba).
- Campos 10 a 12: código del material de construcción de la tubería, el cual, para este caso, al tratarse de acero al carbón, se asignó como AA1.

5. Propiedades termodinámicas de diferentes refrigerantes

Para ello, se realizó una búsqueda del costo por kilogramo; no obstante, el comercio de R21 y R113 se encuentra fuertemente restringido por el Protocolo de Montreal, lo que limita su disponibilidad en el mercado y dificulta la obtención de cotizaciones. En consecuencia, los precios fueron estimados a partir de búsquedas y aproximaciones en la plataforma Alibaba.

En la Tabla 22 se encuentran las propiedades de cada refrigerante analizado junto con su costo por kg.

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Tabla 22*Propiedades termodinámicas de refrigerantes*

Refrigerante		R1	R2	R3	R4	9	9,1	9,2	\$COP/kg
R21 (CHClF - Diclorofluorometano)	Temperatura [°C]	5,54	4,68	36,14	20,10	100	98,01	120	50.000,00
	Presión [kPa]	90	87	157	154	101,3	94,32	87,32	
	Flujo Másico [kg]	843	843	843	843	360	360	360	
	Entalpia [kJ/kgmol]	303100	298200	296400	303100	238700	240700	237900	
R113 (Triclorotrifluoroetano)	Temperatura [°C]	42,96	41,96	60,53	59,89	100	98,01	120	220.000,00
	Presión [kPa]	90	87	157	154	101,3	94,32	87,32	
	Flujo Másico [kg]	1410	1410	1410	1410	360	360	360	
	Entalpia [kJ/kgmol]	698000	693500	691500	698000	238700	240700	237900	
R134a (1,1,1,2- tetrafluoroetano)	Temperatura [°C]	-28,64	-29,37	-7,516	-16,45	100	98,01	120	180.000,00
	Presión [kPa]	90	87	157	154	101,3	94,32	87,32	
	Flujo Másico [kg]	966,4	966,4	966,4	966,4	360	360	360	
	Entalpia [kJ/kgmol]	904800	900300	898700	904800	238700	240800	237900	
R290 (Propano)	Temperatura [°C]	-44,86	-45,61	-20,82	-32,18	100	98,01	120	45.000,00
	Presión [kPa]	90	87	157	148	101,3	94,32	87,32	
	Flujo Másico [kg]	444	444	444	444	360	360	360	
	Entalpia [kJ/kgmol]	112600	108800	107300	112600	238700	240600	237900	
R1270 (Propileno)	Temperatura [°C]	-50,61	-51,34	-23,46	-38,26	100	98,01	120	40.000,00
	Presión [kPa]	90	87	157	154	101,3	94,32	87,32	
	Flujo Másico [kg]	431	431	431	431	360	360	360	
	Entalpia [kJ/kgmol]	7168	3521	2050	7168	238700	240500	237900	
R717 (Amoníaco)	Temperatura [°C]	-35,42	-36,08	11,94	-24,56	100	98,01	122,3	16.000,00
	Presión [kPa]	90	87	157	153	101,3	94,32	89,32	
	Flujo Másico [kg]	172,5	172,5	172,5	172,5	360	360	360	
	Entalpia [kJ/kgmol]	2795	7536	9180	2795	238700	241100	237800	
R718 (Agua)	Temperatura [°C]	98,2	96,10	169,2	111,6	100	98,88	113,7	153,75
	Presión [kPa]	95	88	158	151	101,3	97,32	93,32	

DISEÑO DE BOMBA DE CALOR PARA INDUSTRIA DE BOCADILLO

Flujo Másico [kg]	73	73	73	73	360	360	360
Entalpia [kJ/kgmol]	246900	238800	236300	246900	238700	240300	238200

6. Heurística para la distribución de los equipos

Tabla 23

Heurística para la distribución de los equipos

No.	From/To	Fired Heaters	Reactors	Destil. Columns	Vessels /Drums	Compressor	Hydro. Day T.	Hydro. Pumps	Heat Exchangers	Air Fin Coolers
1	Fired Heaters	X	15	15	15	15	15	15	15	15
2	Reactors	15	X	4,5	4,5	9	15	7	M	4,5
3	Destil. Columns	15	4,5	X	3	7	15	5	M	3
4	Vessels/Drums	15	4,5	3	X	M	15	M	M	3
5	Compressor	15	9	7	M	X	15	7,5	7	7
6	Hydro. Day Tank	15	15	15	15	15	X	15	15	15
7	Hydro. Pumps	15	7	5	M	7,5	15	X	M	M
8	Heat Exchangers	15	M	M	M	7	15	M	X	M
9	Air Fin Coolers	15	4,5	3	3	7	15	M	M	X

Nota. Adaptado de Ray, S., & Das, G. (2020). Process equipment and plant design: principles and practices. Ghent University Library. <https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:4100000011277423>.