

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# **Diseño y análisis de un sistema de bombas de calor y colectores solares para un proceso de calentamiento de agua para el sector hotelero**

Julián David Gómez Restrepo  
Leandro Santillana Santillana

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero Electromecánico

Asesor  
Luis Fernando Cardona Sepúlveda

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica  
Medellín, Colombia  
2024

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

El presente proyecto tuvo como fin el análisis y diseño de un sistema de calentamiento de agua con bomba de calor, como alternativa a una caldera de gas, en el Eco Hotel Piedras Blancas, ya que su alta demanda de agua a una temperatura oscilante entre 50°C y 60°C genera gastos de operación mensuales de aproximadamente \$ 7'289.242. Esta propuesta de reemplazo obedece a las tendencias mundiales de sustitución de equipos que funcionan con quema de combustibles fósiles ya que tienen una huella de carbono e influencia directa en emisiones de gases de efecto invernadero, siendo también menos eficientes que las bombas de calor. Adicionalmente, en el presente proyecto se contempló el acople de un sistema de 34 colectores solares en desuso, ya que su funcionamiento permitirá aumentar la energía térmica entregada al tanque de almacenamiento, disminuyendo el tiempo de funcionamiento de las bombas de calor y obteniendo ahorros directos al aprovechar una fuente gratuita de energía como lo es la radiación solar. Los resultados muestran que se podrían alcanzar ahorros cercanos al 52% por costos de operación respecto al caso actual, con un coeficiente de desempeño de 6.4 y con un tiempo de amortización para la implementación del sistema cercano a los 9 meses.

*Palabras clave:* bomba de calor, colectores solares, caldera a gas, eficiencia energética, calentamiento.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

Agradecemos a nuestras familias por todo el acompañamiento brindado, tanto moral como económicamente en la carrera y en la posibilidad de construir esta gran meta.

Agradecemos al profesor y asesor de trabajo de grados, Luis Cardona, por toda la paciencia, ayuda y correcciones brindadas en el desarrollo de este trabajo, adicional al conocimiento brindado en las diferentes materias que se vieron a lo largo de la carrera. Por último, agradecemos a la universidad, personal y profesores en ella, por todo el desarrollo, tanto académico como humano que hemos obtenido, siendo cada vez mejores personas desde el primer día que pisamos la academia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## ACRÓNIMOS

---

*COP* Coeficiente de rendimiento o desempeño

*CO<sub>2</sub>* Dióxido de carbono

*CST* Concentración solar térmica

*C<sub>p</sub>* Calor específico del agua [kJ/(kg.°C)]

*GLP* Gas licuado del petróleo

*P<sub>Térmica</sub>* Potencia térmica que genera la bomba de calor [kW]

*P<sub>Eléctrica</sub>* Potencia eléctrica que consume el sistema de bombas de calor [kW]

*t* Tiempo de calentamiento del agua [s]

*T<sub>final</sub>* Temperatura final del agua [°C]

*T<sub>inicial</sub>* Temperatura inicial o de suministro del agua [°C]

*UPME* Unidad de Planeación Minero-Energética

*V<sub>T</sub>* Volumen de agua dentro del tanque [m<sup>3</sup>]

*VET* Válvula de expansión termostática

*ρ* Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

*Δt* Diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial [s]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## TABLA DE CONTENIDO

---

1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 Generalidades .....	10
1.2 Objetivos .....	10
1.2.1 General .....	10
1.2.2 Específicos .....	10
1.3 Organización de este trabajo .....	11
2. MARCO TEÓRICO .....	12
2.1 Calderas de gas.....	12
2.2 Bomba de calor .....	14
2.2.1 Compresor .....	16
2.2.2 Condensador .....	19
2.2.3 Evaporador .....	24
2.2.4 Válvula de expansión.....	26
2.3 Colectores solares .....	29
2.4 Modelado matemático y ecuaciones de bombas de calor y colectores solares.....	34
3. METODOLOGÍA.....	37
3.1 Caracterización de los sistemas actuales del Eco hotel Piedras Blancas .....	37
3.2 Diseño y análisis de un sistema de calentamiento a través de bombas de calor y colectores solares térmicos .....	39
3.3 Comparación del sistema de calentamiento que actualmente posee el Eco Hotel Piedras Blancas, a través de gas, con el sistema propuesto .....	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
4.1 Caracterización de los sistemas presentes en el Eco Hotel Piedras Blancas .....	40
4.2 Cálculos térmicos .....	50
4.2.1 Caldera de gas .....	50
4.2.2 Bomba de calor .....	52
4.2.3 Colectores solares térmicos .....	53
4.3 Diseño de un sistema de bombas de calor y colectores solares térmicos.....	54

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.4 Comparación entre el sistema que actualmente tiene el Eco Hotel Piedras Blancas y el propuesto .....	63
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	66
5.1 Conclusiones .....	66
5.2 Recomendaciones .....	66
5.3 Trabajo futuro .....	66
REFERENCIAS .....	68

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1:</b> Caldera básica.....	12
<b>Ilustración 2:</b> Caldera de condensación.....	13
<b>Ilustración 3:</b> Ciclo de refrigeración.....	15
<b>Ilustración 4:</b> Compresor hermético.....	16
<b>Ilustración 5:</b> Esquemático de compresor Scroll.....	17
<b>Ilustración 6:</b> Compresor semi hermético.....	17
<b>Ilustración 7:</b> Diagrama de compresor semi hermético o de pistones.....	18
<b>Ilustración 8:</b> Compresor semi hermético.....	19
<b>Ilustración 9:</b> Intercambiador de calor de cobre por convección natural.....	20
<b>Ilustración 10:</b> Intercambiadores de calor de cobre por convección natural.....	21
<b>Ilustración 11:</b> Intercambiadores de calor de cobre por convección natural en tanque de acumulación.....	22
<b>Ilustración 12:</b> Intercambiador de calor de titanio.....	23
<b>Ilustración 13:</b> Rack de intercambiadores de calor en titanio.....	24
<b>Ilustración 14:</b> Evaporador en bomba de calor aire-aire.....	25
<b>Ilustración 15:</b> Intercambiador de calor tubular.....	26
<b>Ilustración 16:</b> Sistema de tubos capilares.....	27
<b>Ilustración 17:</b> Válvula de expansión termostática.....	28
<b>Ilustración 18:</b> Válvula de expansión electrónica.....	29
<b>Ilustración 19:</b> Representación gráfica de STC.....	30
<b>Ilustración 20:</b> Configuración del colector solar térmico de tubo al vacío.....	31
<b>Ilustración 21:</b> Sistema de colectores solares térmicos de tipo tubos al vacío.....	32
<b>Ilustración 22:</b> Colectores solares térmicos de placa plana.....	33
<b>Ilustración 23:</b> Sistema de colectores solares térmicos de placa plana.....	34
<b>Ilustración 24:</b> Toma de medidas para posible ubicación de bombas de calor.....	38
<b>Ilustración 25:</b> Caldera de gas presente en el Eco Hotel Piedras Blancas.....	40
<b>Ilustración 26:</b> Esquemático de partes de caldera Kastor 800.....	42
<b>Ilustración 27:</b> Secuencia de funcionamiento.....	43
<b>Ilustración 28:</b> Ejemplo de instalación de caldera Kastor 800.....	43
<b>Ilustración 29:</b> Vista lateral de caldera Kastor 800.....	44
<b>Ilustración 30:</b> Vista frontal de caldera Kastor 800.....	45
<b>Ilustración 31:</b> Esquemático hidráulico sistema de climatización de Eco Hotel Piedras Blancas.....	45
<b>Ilustración 32:</b> Colectores solares de placa plana en Eco Hotel Piedras Blancas.....	47
<b>Ilustración 33:</b> Intercambiador de placas.....	48
<b>Ilustración 34:</b> Conexiones de los colectores solares térmicos.....	48
<b>Ilustración 35:</b> Conexión hidráulica de todo el sistema.....	49
<b>Ilustración 36:</b> Variables declaradas en cálculo de potencia de colectores solares térmicos.....	53

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

<b>Ilustración 37:</b> Potencia de 1 colector solar térmico .....	53
<b>Ilustración 38:</b> Compresor Copeland ZKR3-PF.....	56
<b>Ilustración 39:</b> Configuración de bomba de recirculación para los intercambiadores de calor.....	57
<b>Ilustración 40:</b> Motobomba Pedrollo CP660M.....	58
<b>Ilustración 41:</b> Curva de caudal vs altura manométrica.....	59
<b>Ilustración 42:</b> Esquema propuesto.....	60
<b>Ilustración 43:</b> Comportamiento del sistema en alta demanda de agua .....	61
<b>Ilustración 44:</b> Sistema propuesto. (Fuente propia).....	61
<b>Ilustración 45:</b> Comportamiento del sistema en momentos de baja demanda de agua.....	62



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1:</b> Comparativa bomba de calor vs Caldera .....	15
<b>Tabla 2:</b> Condiciones eléctricas requeridas por una bomba de calor.....	38
<b>Tabla 3:</b> Especificaciones técnicas de caldera de gas Kastor 800 .....	41
<b>Tabla 4:</b> Especificaciones técnicas de controlador de temperatura.....	42
<b>Tabla 5:</b> Cálculos térmicos para caldera de gas.....	50
<b>Tabla 6:</b> Composición del GLP.....	51
<b>Tabla 7:</b> Cálculo de calor producido por GLP.....	51
<b>Tabla 8:</b> Cálculos térmicos bomba de calor.....	52
<b>Tabla 9:</b> Cálculos térmicos para colector solar .....	53
<b>Tabla 10:</b> Características bomba de calor.....	54
<b>Tabla 11:</b> Ficha técnica frigorífica del compresor.....	55
<b>Tabla 12:</b> Ficha técnica eléctrica del compresor.....	55
<b>Tabla 13:</b> Ficha técnica de motobomba Pedrollo CP660M.....	58
<b>Tabla 14:</b> Jerarquía de operación.....	61
<b>Tabla 15:</b> Cálculo de potencia eléctrica total del sistema de bombas de calor.....	62
<b>Tabla 16:</b> Cálculo de COP del sistema de bombas de calor.....	63
<b>Tabla 17:</b> Comparativa de costos de operación.....	64
<b>Tabla 18:</b> Comparativa de emisiones de CO2 .....	65

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Generalidades

El gremio hotelero en el país es uno de los sectores que más desarrollo ha tenido en los últimos años, creando una propuesta turística que genera un crecimiento económico en la zona donde están ubicados. El Eco Hotel Piedras Blancas posee una variedad de servicios en su portafolio ya que, por su ubicación geográfica, el agua caliente es uno de los principales atractivos de la edificación, ofreciendo zonas de jacuzzis, bañeras de agua caliente y lavamanos climatizados.

Adicional al confort ofrecido, el agua caliente es utilizada para el lavado de utensilios de cocina, ya que estos deben de ser desinfectados y lavados a cierta temperatura. Para el calentamiento de este fluido, el hotel actualmente cuenta con una caldera de gas natural, la cual calienta un tanque de agua sanitaria que posteriormente será distribuido por todo el hotel. Este ciclo de calentamiento se realiza bajo una histéresis de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , donde el setpoint de temperatura actual está en  $60^{\circ}\text{C}$ . Esto quiere decir que el calentamiento de los jacuzzis, lavamanos, bañeras y zona de utensilios están operando gracias a la quema de GLP, el cual emite gases de efecto invernadero en el ambiente.

Para la resolución de estas problemáticas, en este trabajo se propone el reemplazo del sistema de calentamiento actual, de quema de GLP, por uno libre de emisiones de  $\text{CO}_2$  altamente eficiente como el de bombas de calor. La implementación de este sistema permitirá al Ecohotel Piedras Blancas eliminar su dependencia de la quema de combustibles para el calentamiento de agua, y donde se restaurará el funcionamiento de 34 colectores térmicos para reducir los ciclos de funcionamiento de las bombas de calor

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

Diseñar y analizar un sistema de calentamiento de agua a través de bombas de calor y colectores térmicos, esto con el fin de reemplazar en un futuro el sistema de calentamiento a través de gas en el hotel de Piedras Blancas.

### 1.2.2 Específicos

- Caracterizar los sistemas que actualmente se tienen en el Eco hotel Piedras Blancas, con el fin de analizar sus consumos energéticos, económicos y ambientales, donde se buscarán oportunidades de mejora.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Diseñar y analizar un sistema de calentamiento a través de bombas de calor y colectores térmicos solares, que permitan la entrega de una potencia térmica suficiente para abastecer la alta demanda de agua caliente en el Eco hotel Piedras Blancas.
- Realizar la comparación del sistema de calentamiento que actualmente posee el Eco Hotel Piedras Blancas, a través de gas, con el sistema propuesto, con bombas de calor, donde se medirán los beneficios monetarios, tiempos de amortización de inversión y beneficios a futuro.

### 1.3 Organización de este trabajo

En este documento se presenta de forma ordenada el planteamiento de un diseño de aplicación de bombas de calor en conjunto con un sistema de colectores solares térmicos, con el propósito de reemplazar una caldera de gas que actualmente se tiene para el calentamiento de agua en un Eco Hotel.

El primer capítulo presenta una breve introducción al trabajo. En el segundo capítulo se presenta un marco teórico, donde se presentan los sistemas involucrados, empezando por las calderas de gas, pasando por la bomba de calor y sus componentes, y finalizando con los colectores solares térmicos.

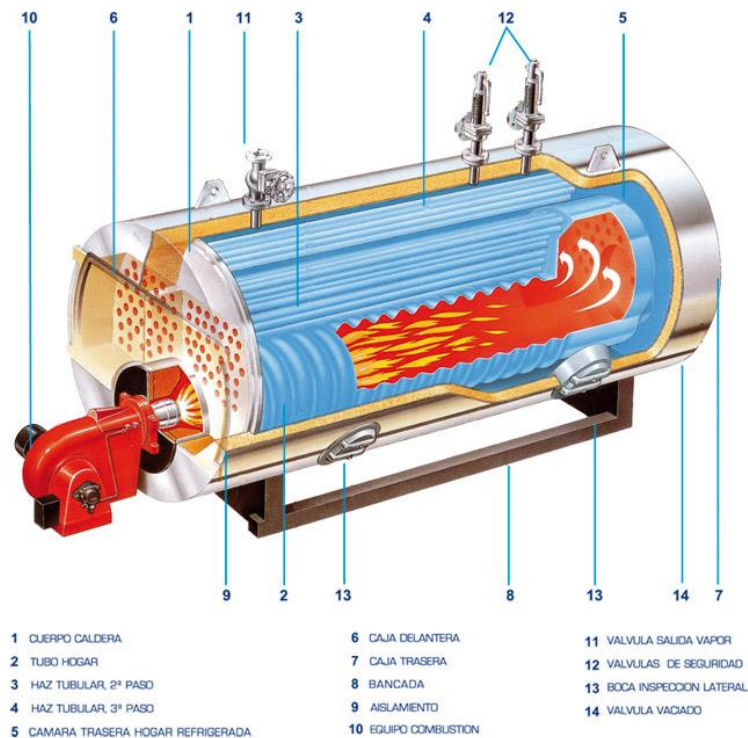
En el tercer capítulo se presenta la metodología propuesta, donde se describen los pasos para el diseño de un sistema de bombas de calor integrado con un conjunto de colectores solares térmicos, enrutado en el cumplimiento de los objetivos planteados.

Finalmente, en los capítulos cuatro y cinco, se presentan los resultados y discusiones de las diferentes caracterizaciones, diseños y propuestas presentadas para el cumplimiento del objetivo general, dando espacio a las conclusiones y recomendaciones para un trabajo futuro. También se presentan la bibliografía correspondiente a todas las referencias mencionadas en el documento.

## 2. MARCO TEÓRICO

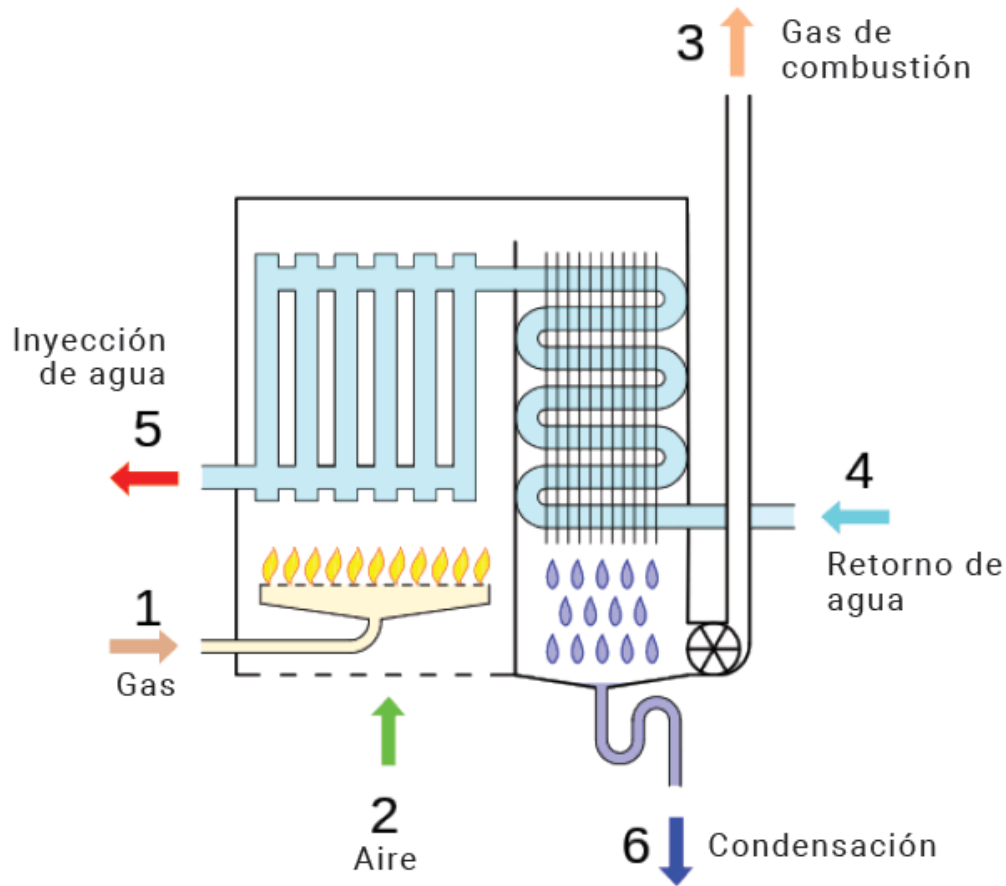
### 2.1 Calderas de gas

A nivel industrial es muy común el uso de dispositivos térmicos para los procesos de calentamiento de agua, siendo la caldera de gas una de las opciones más utilizadas. Los sistemas de calderas actuales se dividen en dos categorías: la caldera convencional y la caldera de condensación. La caldera convencional aprovecha el calor directo de la combustión para calentar el agua a través de un intercambiador de calor. Para mejorar la eficiencia energética, se han desarrollado las calderas de condensación, las cuales logran recuperar el calor del vapor de agua presente en los gases de escape mediante un intercambio adicional de calor entre estos gases y el agua caliente, permitiendo reutilizar ese calor en el sistema (Shin et al., 2023). Estas calderas se pueden apreciar en las ilustraciones 1 y 2 respectivamente.



**Ilustración 1:** Caldera básica.

Fuente: (Sogecal, 2024)



**Ilustración 2:** Caldera de condensación.  
Fuente: (Intergas, 2019)

Las calderas han tenido evolución a lo largo del tiempo con el fin de reducir el impacto ambiental y la huella de carbono que éstas producen, donde día a día las constantes regulaciones de los gobiernos hacen que los sistemas deban tener mayor eficiencia. Según Braungardt et al., 2023, en la actual situación geopolítica, la UE y sus estados miembros están intensificando sus esfuerzos para disminuir su dependencia de las importaciones de combustibles fósiles, mientras enfrentan la crisis climática. Como la calefacción en los edificios constituye una parte importante del consumo energético en la UE, las políticas destinadas a eliminar gradualmente los combustibles fósiles en la calefacción y promover el uso de energías renovables son factores clave en esta transición. Sin embargo, ¿es posible la supresión de sistemas como las calderas? Actualmente las calderas son utilizadas en procesos de calentamiento de agua estacionaria (tanques), consumo masivo, como la industria alimenticia y generación de energía. Según Wang et al., 2022, el carbón es el

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

combustible fósil más abundante y representó aproximadamente el 38% de la generación de energía mundial en 2018; en general, el continente europeo por sus condiciones geográficas, carencia de fuentes híbridas y demás problemas asociados a la incapacidad de instalar centrales hidroeléctricas, recurren a las fuentes convencionales de producción de energía, donde las centrales termoeléctricas son la principal opción. Respecto a esto, es posible que las calderas sigan en pleno funcionamiento en un futuro para la generación de energía eléctrica y demás procesos en los que no hay una alternativa, sin embargo, en muchos espacios de la industria se ha venido haciendo un reemplazo tecnológico y progresivo de estos sistemas, donde el agua puede estar en una temperatura entre 50°C a 60°C, siendo accesible a otra clase de máquinas.

## 2.2 Bomba de calor

Una bomba de calor es una máquina electromecánica que funciona a través de un ciclo de refrigeración, el cual absorbe calor desde una fuente gratuita como lo es el medio ambiente, (bomba de calor aire-agua) o desde la recuperación de calor en un proceso cercano que desperdicie calor, por ejemplo, el agua residual de una caldera de gas (bomba de calor agua-agua).

Las bombas de calor eléctricas están ganando relevancia como una alternativa esencial para reemplazar las fuentes térmicas tradicionales, debido a su alta eficiencia y bajas emisiones de carbono. Este sistema puede reducir el consumo de energía en un 75% en comparación con las calderas de gas, además de no generar emisiones directas de carbono. Funciona con electricidad y transfiere calor desde fuentes de baja temperatura, como el aire, el agua o la energía geotérmica, para ser utilizado en la calefacción (Dong et al., 2023). Al no producir gases de efecto invernadero, es una de las opciones de energía alternativa que más ha evolucionado en los últimos años, optimizando los gases refrigerantes y mejorando los consumos eléctricos del sistema en general. La bomba de calor es considerada una fuente de energía no convencional, ya que, al utilizar electricidad, permite transferir el calor desde una fuente de menor temperatura hacia una de mayor temperatura. Un sistema de calefacción basado en una bomba de calor consta de tres componentes clave: la fuente inferior, que puede ser el suelo, agua o aire, de donde extrae energía; la bomba de calor, que convierte este calor ambiental en energía utilizable; y la fuente superior, que corresponde a un sistema de calefacción central o un depósito de agua caliente (Kijo-Kleczkowska et al., 2023).

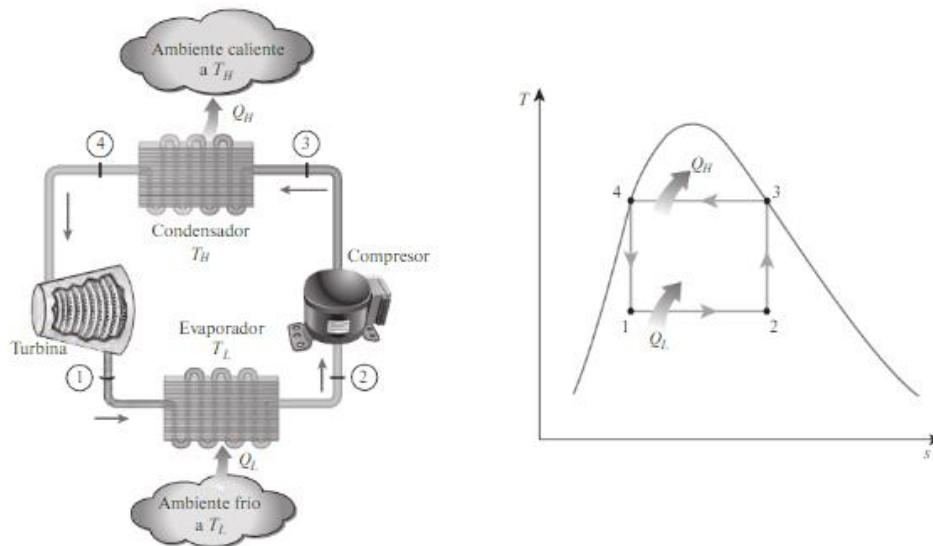
Para entender la ventaja clave de la bomba de calor respecto a calderas, se tiene la tabla 1:

**Tabla 1:** Comparativa bomba de calor vs Caldera

Caldera	Bomba de calor
Generan el calor a través de la quema de un combustible	No generan el calor, absorben energía de un medio gratuito y lo convierten en calor útil
Alta huella de carbono con la liberación de gases de efecto invernadero	No genera gases de efecto invernadero, su huella de carbono depende únicamente de la fuente de generación eléctrica.

Fuente: (Cengel et al., 2019)

Al ser una máquina que funciona con ciclos de refrigeración, el calor que se entrega al sistema no se genera a través de una llama, como lo es el caso de las calderas, sino que su principio de funcionamiento se basa en la absorción de energía desde un punto caliente, para llevarlo hacia un punto frío, únicamente ingresando un trabajo, en este caso, eléctrico hacia el compresor. El ciclo de refrigeración de una bomba de calor se puede observar en la Ilustración 3.



**Ilustración 3:** Ciclo de refrigeración.

Fuente: (Cengel et al., 2019)

En términos generales, una bomba de calor está compuesta de cuatro elementos principales, los cuales son: el compresor, el condensador, el evaporador y la válvula de expansión.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 2.2.1 Compresor

Es una máquina electromecánica que se encarga de comprimir y aumentar la presión de un gas refrigerante, esto con el fin de que el calor absorbido en el proceso de evaporación, adicional al trabajo mecánico inyectado por el compresor sea liberado en un condensador, aprovechando los cambios de estado de este gas refrigerante y pudiendo trasladar energía absorbida de un punto A (ambiente) a un punto B (Tanque). Existen distintos tipos de compresores en sistemas de refrigeración, donde los principales son:

- **Compresor hermético Scroll:** Estos compresores tienen como característica principal que son sellados y libres de mantenimiento, sin embargo, cuando tienen una falla interna deben de ser desechados ya que no se recomienda romper su hermeticidad por razones de seguridad. “El fluido de trabajo ingresa en la periferia de una espiral en movimiento que gira alrededor de una espiral estacionaria y mueve el fluido a la región central donde se descarga” (El Samad et al., 2024).

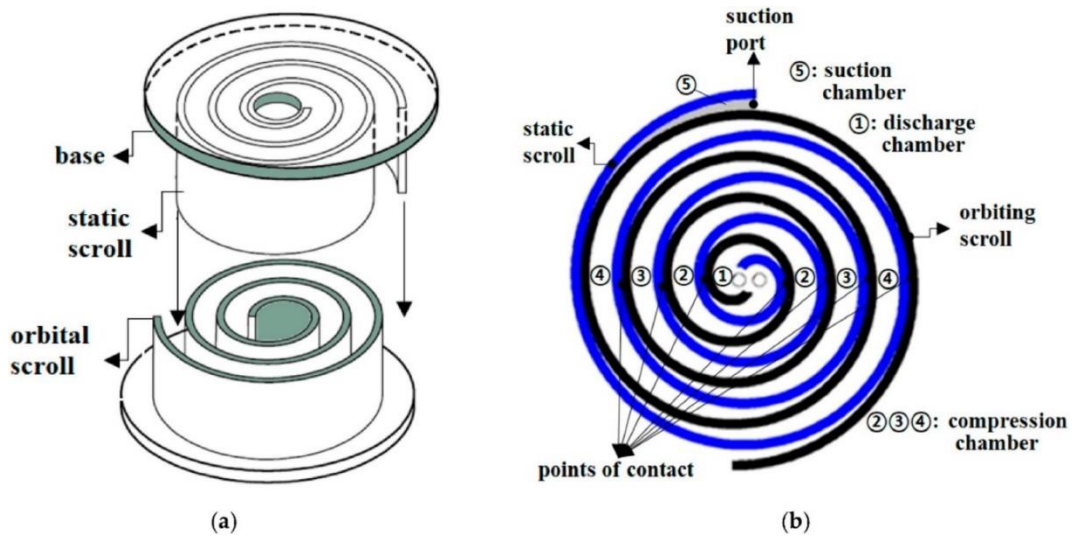


**Ilustración 4:** Compresor hermético.  
Fuente: (IPR y repuestos, 2024)

Este tipo de compresores están presentes en aplicaciones que demanden entre 36.000 y 120.000 BTU/h, ya que inferior a este rango se utilizan compresores recíprocos, y mayor a éste se utilizan compresores semi herméticos. El esquemático de partes del compresor



tipo Scroll se presenta en la siguiente ilustración, donde se pueden apreciar los diferentes componentes que integran dicha unidad electromecánica.



**Ilustración 5:** Esquemático de compresor Scroll.

Fuente: (El Samad et al., 2024)

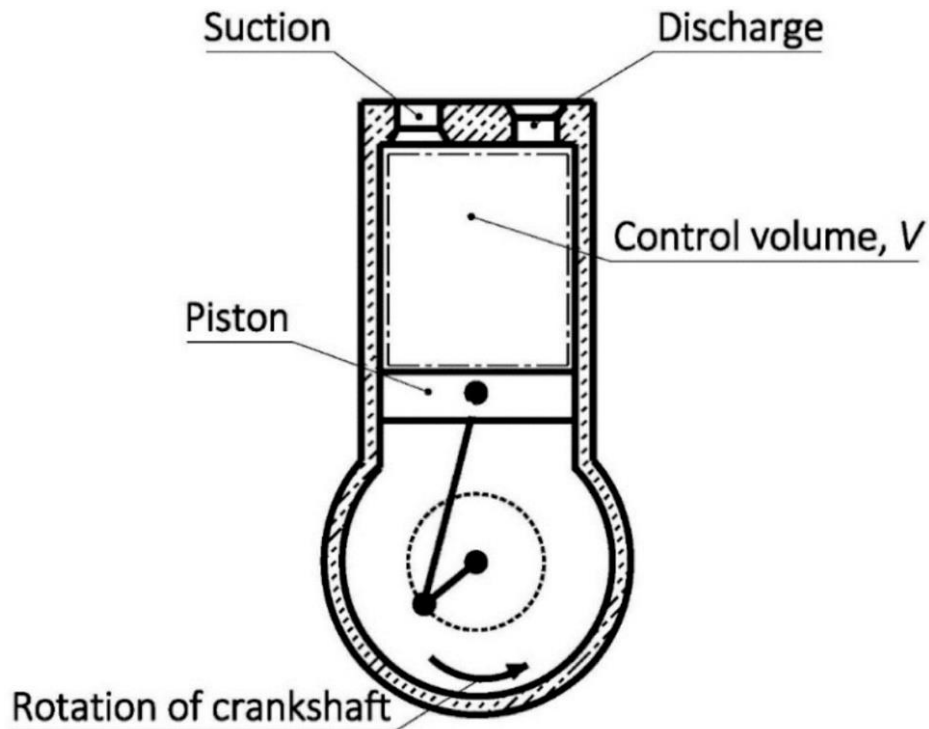
- **Compresor semi hermético:** Es un tipo de compresor que brinda la posibilidad de ser desmontados internamente para un recambio de elementos que potencialmente fallan, como lo son los rodamientos, válvulas y demás partes que sufren un desgaste natural. Este tipo de compresores son usados en sistemas de alta potencia, como son chillers y bombas de calor para piscinas olímpicas que tienen una demanda por encima de 120.000 BTU/h.



**Ilustración 6:** Compresor semi hermético.

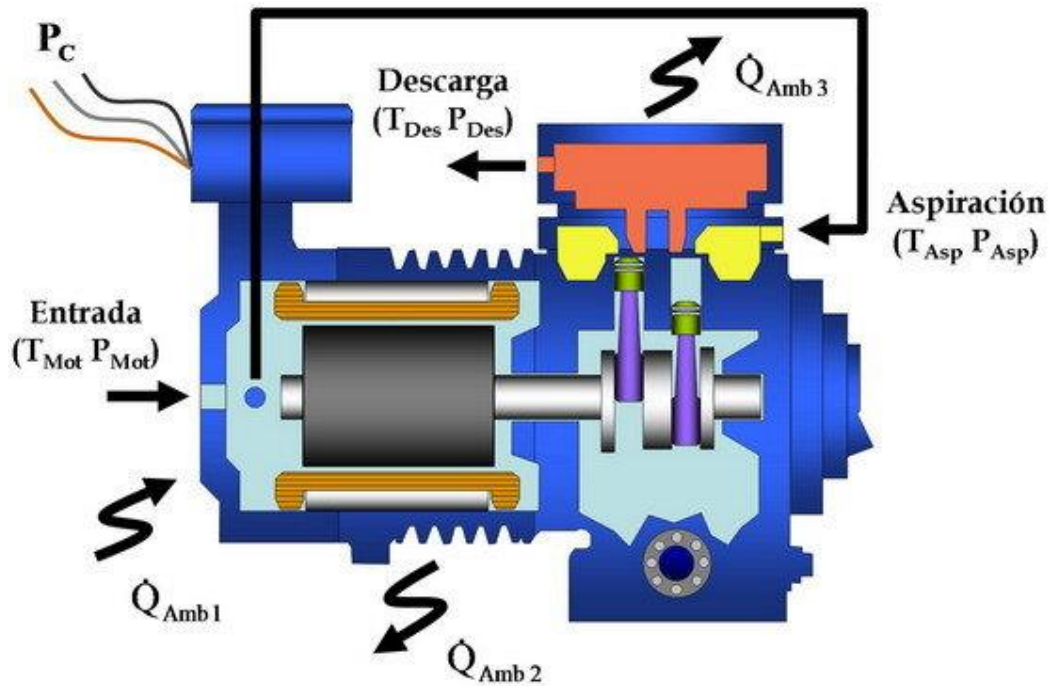
Fuente: (Dorin Innovation, 2024)

Estos compresores tienen un principio de funcionamiento basados en la presurización a través de pistones. Los compresores de pistón alternativo funcionan mediante el movimiento de un pistón, accionado por un cigüeñal, dentro de un cilindro para comprimir el gas (El Samad et al., 2024). El esquemático de funcionamiento del compresor semi hermético se presenta en la siguiente ilustración:



**Ilustración 7:** Diagrama de compresor semi hermético o de pistones.  
Fuente: (El Samad et al., 2024).

Como se puede observar, el sistema consta de tres elementos esenciales, los cuales son el pistón, la biela y el cigüeñal, con semejanza a los sistemas de combustión interna. El sistema completo se puede observar en la Ilustración 8:



**Ilustración 8:** Compresor semi hermético.  
 Fuente: (Sánchez García-Vacas, D., 2010)

### 2.2.2 Condensador

También llamado intercambiador de calor es el elemento encargado de transferir el calor del gas refrigerante hacia el fluido a calentar, en este caso agua, donde el gas genera un cambio de estado de gaseoso a líquido, también llamado “condensación”. Los intercambiadores de calor internos son componentes auxiliares empleados en ciclos de una o varias etapas, o en cascada. Su función es transferir calor del refrigerante después de la condensación (en ciclos subcríticos) o durante el enfriamiento de gas (en ciclos transcritos) hacia el refrigerante antes de la evaporación. Esto genera temperaturas más altas tanto en la succión como en la descarga del compresor. También pueden ser utilizados para sobrecalentar el refrigerante antes de su compresión (El Samad et al., 2024).

Este elemento puede presentarse en diferentes geometrías, tamaños y materiales, según su aplicación, siendo el cobre, el titanio y el hierro los materiales más utilizados. Por otro lado, el intercambio de calor se presenta a través de convección natural (intercambiador inundado) o por convección forzada (recirculación del fluido a través de motobomba), como se puede observar en las ilustraciones 9 y 10 respectivamente:

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Ilustración 9:** Intercambiador de calor de cobre por convección natural.  
Fuente propia

Como se puede observar, el intercambiador es netamente cobre flexible por donde circula internamente el gas refrigerante, y al estar en contacto directo con el agua (inundado en un tanque) el calor se transfiere del intercambiador hacia el fluido, para hacer una analogía, este principio de funcionamiento es el de las resistencias eléctricas. La transferencia de calor por convección en intercambiadores de calor de carcasa y tubos se aplica en diversas áreas, incluyendo la generación de energía eléctrica, reactores nucleares, procesos de enfriamiento y calentamiento, así como en la industria química, entre otros (Sun et al., 2024).

Este intercambiador de calor no puede estar en sitios donde haya una tasa de flujo constante de entrada y salida, ya que por su dimensionamiento y forma de calentamiento

no permite una transferencia de calor uniforme en toda la superficie de contacto, perdiendo eficiencia en ese tipo de aplicaciones. Un ejemplo de aplicación de estos intercambiadores de calor está presente en las redes hospitalarias, donde se tiene un tanque de acumulación que almacena el agua caliente y, posteriormente en las horas de alta demanda, se distribuye por toda la edificación, asimismo, en los momentos de baja demanda de agua caliente, el intercambiador de calor transfiere su energía térmica progresivamente al tanque de acumulación, repitiendo el ciclo de una forma eficiente.



**Ilustración 10:** Intercambiadores de calor de cobre por convección natural  
Fuente propia



**Ilustración 11:** Intercambiadores de calor de cobre por convección natural en tanque de acumulación.  
Fuente propia

Adicional al intercambiador de calor por convección natural, se presenta una segunda configuración muy utilizada que es el intercambiador de calor por convección forzada, donde un caudal (usualmente agua), es bombeado a través de diferentes canales donde se tienen los tubos de recirculación de gas refrigerante, generando un intercambio de calor a través del contacto. Un ejemplo de éste se presenta en la siguiente ilustración, donde se tiene un intercambiador de titanio, comúnmente utilizado en aplicaciones de piscinas y sistemas de baja e intermedia potencia.



**Ilustración 12:** Intercambiador de calor de titanio  
Fuente propia

Este intercambiador consta de una coraza en plástico ABS, sin embargo, internamente la espiral por donde fluye el gas refrigerante es en titanio, el cual, posee una resistencia superior a la corrosión respecto a otros materiales, como lo es el hierro, siendo idóneo para aplicaciones donde el agua posee químicos corrosivos, como el cloro de las piscinas. Este tipo de intercambiadores de calor son muy eficientes, sin embargo, dependen de un bombeo constante de líquido a través de ellos, ya que un flujo ineficiente genera que la presión del gas refrigerante se incremente por falta de transferencia de calor, llegando a dilatar y fracturar su coraza externa (plástico ABS). En sistemas de amplios volúmenes, como lo es por ejemplo el calentamiento de una piscina de dimensiones olímpicas, (alrededor de  $4000\text{ m}^3$ ), se utilizan racks de intercambiadores de calor en titanio, ya que

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

por sus características permiten distribuir de manera uniforme el espacio disponible, como se muestra en la **Ilustración 13**:



**Ilustración 13:** Rack de intercambiadores de calor en titanio  
Fuente propia

### 2.2.3 Evaporador

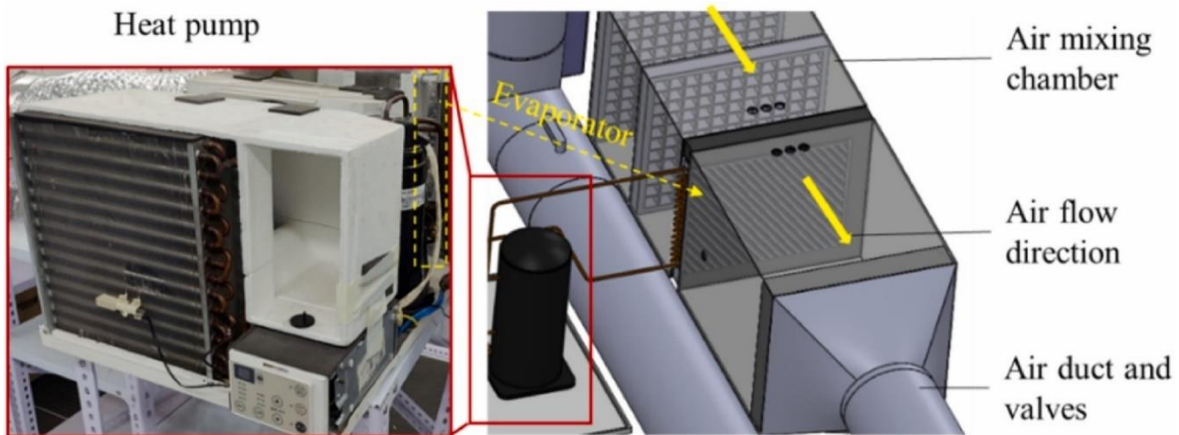
Es el elemento encargado de captar la energía térmica presente en un medio (en este caso el ambiente) y transferirlo al gas refrigerante, el cual, después de un ciclo de expansión y



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

posterior al ingreso en el evaporador, viene a baja presión y temperatura, y posterior a su salida, sale a baja presión, pero con un sobrecalentamiento, también llamado *superheat*. El evaporador se puede considerar como otro intercambiador de calor según sea su aplicación, ya que la diferencia entre una bomba de calor y un aire acondicionado principalmente se encuentra en la dirección del ciclo de refrigeración. La capacidad de calefacción de una bomba de calor de compresión de vapor depende principalmente de la cantidad de calor que el intercambiador de calor de tubo con aletas externas absorbe del aire exterior (Li et al., 2024). El evaporador consta de un sistema tubular en forma de serpentín, donde tiene conectados un gran número de láminas delgadas de aluminio que tienen como propósito la absorción térmica del ambiente, donde a través de ellas fluye aire generado por un ventilador de tipo axial o centrífugo.

Según el tipo de bomba de calor, el evaporador cambia su geometría, por ejemplo, el evaporador de láminas se encuentra en una bomba de calor aire-aire, como se observa en la Ilustración 14:



**Ilustración 14:** Evaporador en bomba de calor aire-aire.

Fuente: (Li et al., 2024)

En aplicaciones industriales, la bomba de calor emplea otro tipo de evaporador en un proceso llamado *recuperación de calor*; éste permite recuperar parte de la energía desechada en un proceso industrial, como lo es por ejemplo el agua residual en un proceso de calentamiento de alimentos, que, al ser baja su temperatura, no puede seguir empleándose en el mismo proceso, pero que su temperatura puede ser igual o superior a la del ambiente, transfiriendo dicha energía en forma de *superheat* a través de un intercambiador de calor tubular, como el que se observa en la Ilustración 15:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Ilustración 15:** Intercambiador de calor tubular.  
Fuente propia

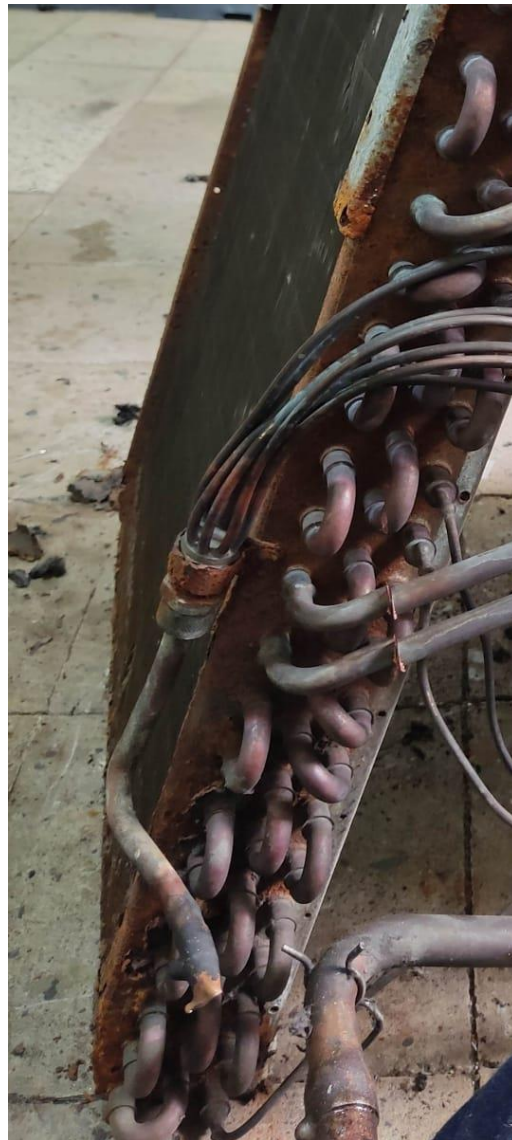
En este evaporador, el agua residual de un proceso térmico entra por un extremo y, dentro de éste, permite el intercambio de calor con el gas refrigerante, generando una evaporación del fluido. Este tipo de evaporador aumenta el COP general del sistema, ya que más allá de recuperar el calor de un proceso residual, no posee motor ventilador, disminuyendo el costo energético del sistema.

#### **2.2.4 Válvula de expansión**

Es un elemento que permite generar un cambio en la presión del sistema, donde el gas refrigerante antes de ésta tiene alta presión y temperatura, y posteriormente, al generar una contracción, seguida de una dilatación inmediata en el recorrido del gas refrigerante, pasa a tener una baja presión y temperatura, permitiendo que, a través del evaporador, se genere una absorción térmica de la energía del medio ambiente. En aplicaciones pasadas, se utilizaba el sistema por tubo capilar, como se puede observar en la Ilustración 16 donde el gas refrigerante presentaba una contracción considerable en su recorrido, y

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

posteriormente a través de una flauta de expansión, permitía que su temperatura y presión disminuyeran. Este sistema fue muy efectivo en aplicaciones pasadas por su simplicidad, sin embargo, la eficiencia es muy susceptible a las condiciones de aplicación, donde en ciudades con baja presión atmosférica y/o bajas temperaturas presentaban una disminución considerable en el desempeño.



**Ilustración 16:** Sistema de tubos capilares.  
Fuente propia

Para optimizar el desempeño de un sistema de refrigeración, se implementó la válvula de expansión termostática (VET), la cual posee un bulbo que va directamente conectado a la descarga del evaporador, el cual contiene internamente un líquido dilatador que, según la

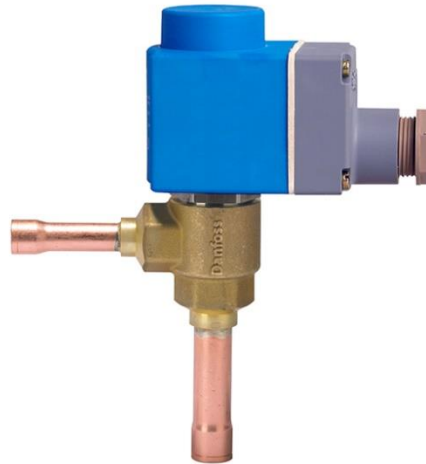
temperatura de sobrecalentamiento del gas refrigerante, permite que la VET se abra o cierre mecánicamente, lo que permite que el *superheat* se adapte en diferentes condiciones climáticas y geográficas.



**Ilustración 17:** Válvula de expansión termostática.  
Fuente propia

Adicionalmente, en sistemas de refrigeración de alta precisión se utilizan válvulas de expansión electrónicas, las cuales presentan un diafragma que abre y cierra según las condiciones de una sonda de temperatura presente en la descarga del evaporador, controlando el *superheat* en tiempo real y con mayor velocidad, ésta se puede observar en la Ilustración 18:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



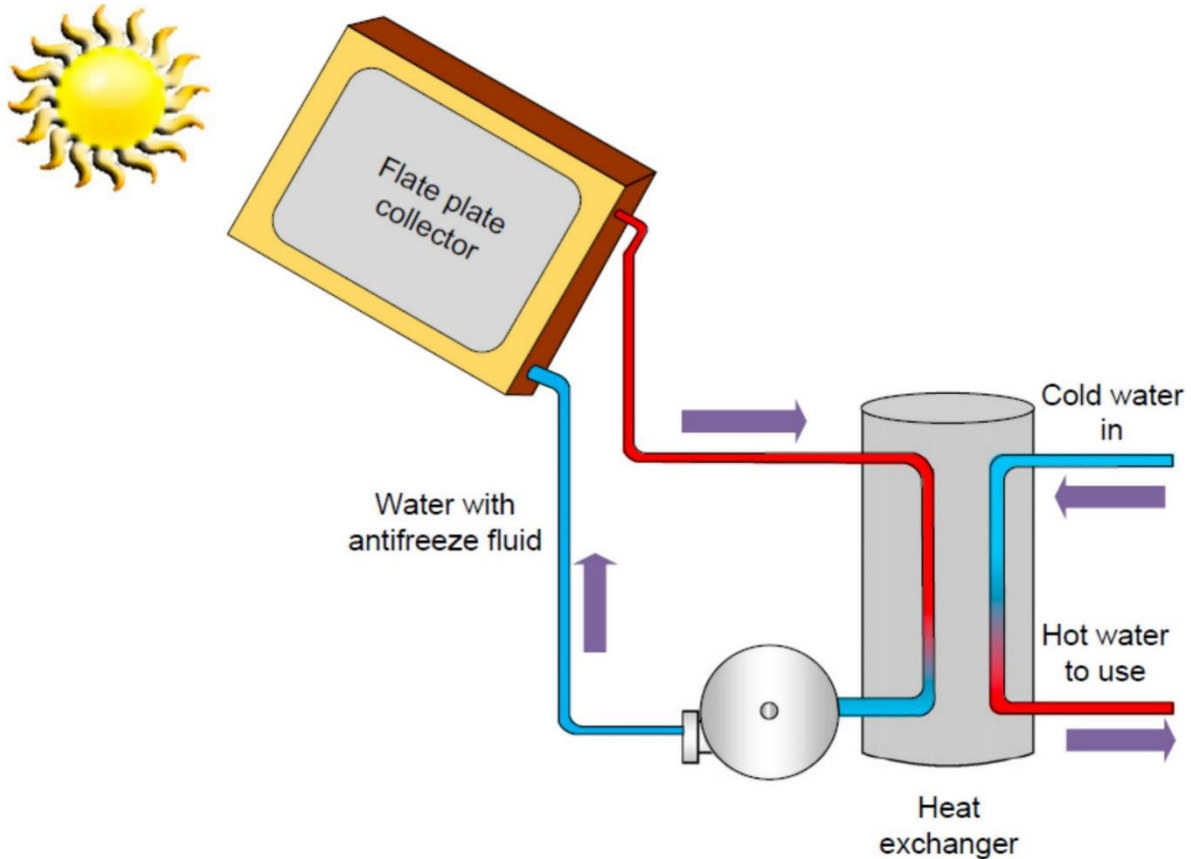
**Ilustración 18:** Válvula de expansión electrónica.  
Fuente: (Danfoss, 2024)

Esta válvula de expansión es muy utilizada en sistemas de refrigeración variables, los cuales poseen diferentes ciclos de refrigeración por cada unidad evaporadora conectada, requiriendo una adaptabilidad constante en el *superheat*.

### 2.3 Colectores solares

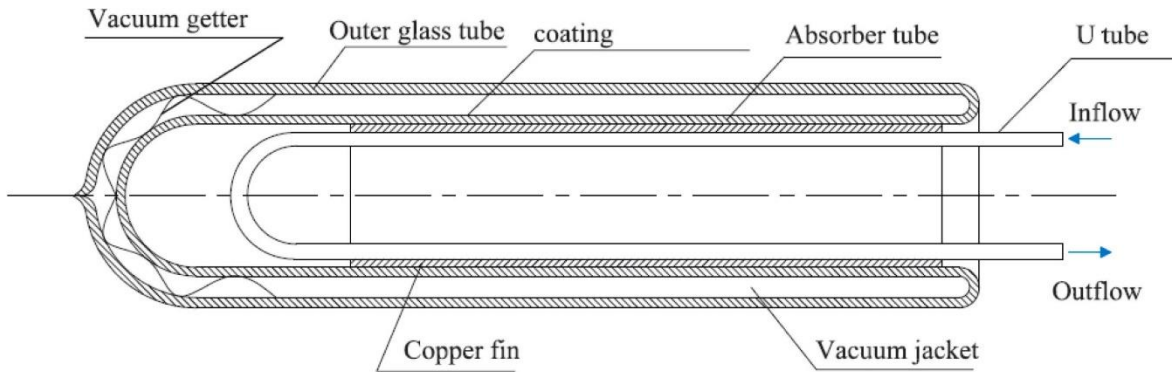
Los colectores solares térmicos (STC) son un conjunto de placas que se encargan de absorber la radiación solar y la transfieren a un fluido, en este caso agua, en los sistemas de tecnología solar térmica (STC), a diferencia de las tecnologías solares fotovoltaicas, el enfoque principal es la generación de calor en lugar de electricidad, lo que simplifica el mecanismo y el ciclo. En esta configuración, el colector térmico absorbe el calor del sol y lo transfiere a un fluido de transferencia de calor (HTF), elevando su temperatura. Luego, el fluido caliente se envía al intercambiador de calor para liberar su calor y enfriarse, después de lo cual regresa al colector térmico mediante una bomba, reiniciando el ciclo (Vahidhosseini et al., 2024). Los colectores solares térmicos son altamente eficientes ya que su ciclo de funcionamiento requiere muy poca energía externa, donde la motobomba que impulsa el agua hacia la parte superior del colector es de pequeñas proporciones, y el beneficio neto de la energía térmica absorbida es alto. Existen diferentes tipos de colectores térmicos, según la aplicación, en particular, la parte del colector térmico ubicada en el techo frecuentemente utiliza tecnología de tubo de vacío. En este diseño, los tubos que absorben calor están contenidos dentro de una capa transparente evacuada, generalmente hecha de vidrio y diseñada para resistir la presión atmosférica. El aislamiento al vacío en estos tubos

evita la pérdida de calor hacia el entorno, y la transparencia de la capa es esencial para permitir que los rayos solares la atraviesen (Vahidhosseini et al., 2024).

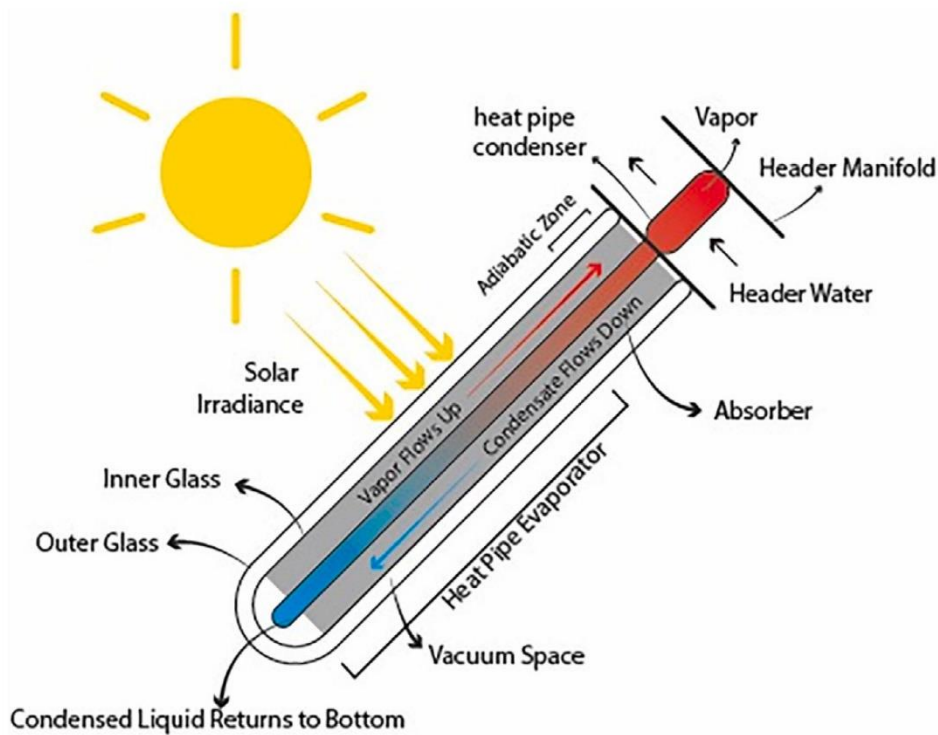


**Ilustración 19:** Representación gráfica de STC.  
Fuente: (Vahidhosseini et al., 2024)

Este tipo de colectores presentan una configuración tubular, la cual permite posicionar una mayor cantidad de estos en un área reducida, su configuración se representa en la Ilustración 20:



(a)



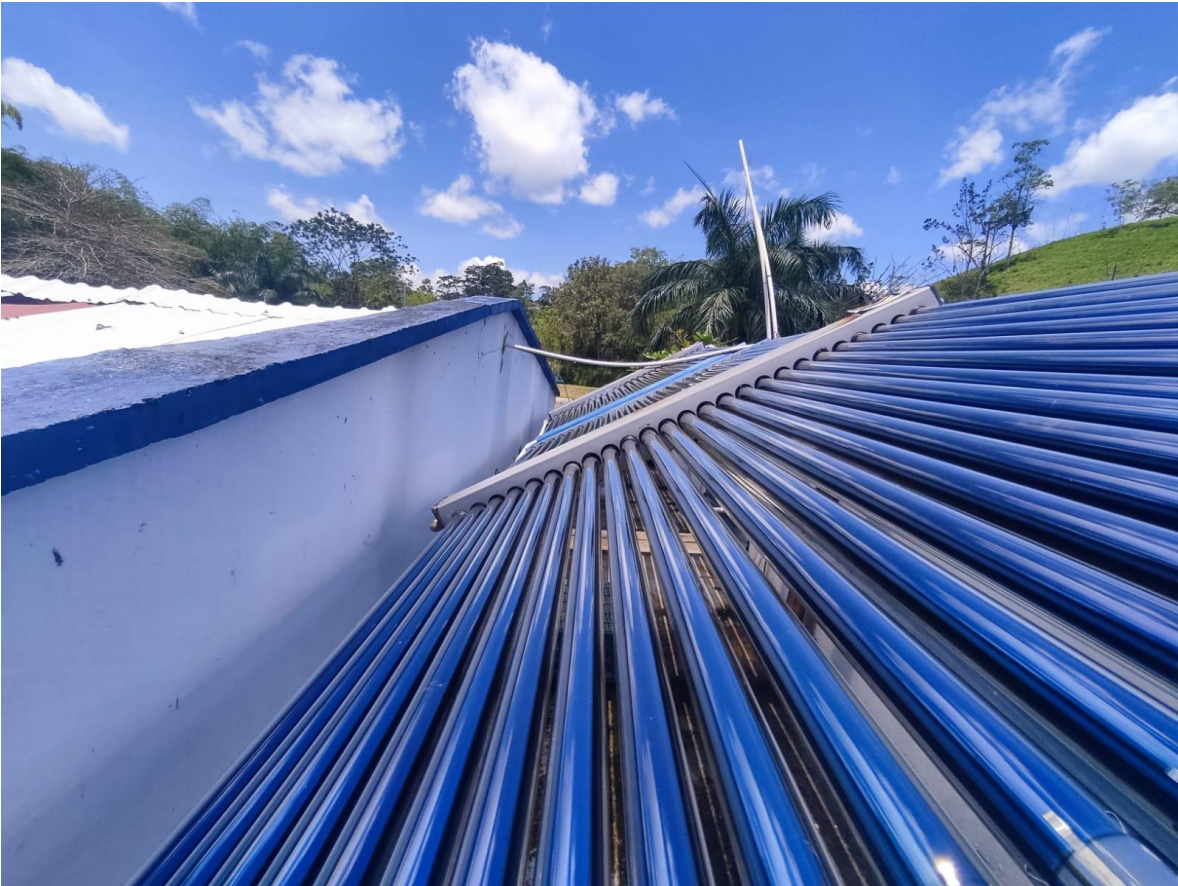
(b)

**Ilustración 20:** Configuración del colector solar térmico de tubo al vacío.

Fuente: (Vahidhosseini et al., 2024)

Para un ejemplo de aplicación, se tiene un sistema de colectores solares térmicos de tubo al vacío, los cuales son implementados para el calentamiento de estanques en la industria piscícola, donde el agua se estima debe estar en un rango de temperaturas entre 28°C y 30°C:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Ilustración 21:** Sistema de colectores solares térmicos de tipo tubos al vacío.  
Fuente propia

Adicionalmente, la configuración del colector solar puede ser sin el intercambiador de calor debido a la estratificación. Según Jaber et al., 2024, la estratificación térmica se refiere a las variaciones de temperatura que se producen de manera vertical dentro del tanque de almacenamiento térmico. La región termoclina actúa como una barrera natural que separa las zonas de agua caliente y fría. Este fenómeno es crucial para evaluar el rendimiento térmico del sistema y también funciona como un indicador del rendimiento específico. El agua de menor temperatura se encuentra en el fondo del tanque, por lo que una bomba extraería el agua desde el fondo y, al momento de ser calentado por el colector térmico solar, esta volvería a la parte superior del tanque, obteniendo mejores eficiencias ya que se reducen las pérdidas térmicas del intercambiador de calor.

Para este tipo de colectores sin intercambiadores de calor, y, con el fin de no generar fracturas por cambios abruptos en la temperatura, se utilizan colectores solares térmicos de placa plana, los cuales están compuestos por un sistema de tuberías de cobre en forma de serpentín y una placa, generalmente, acrílica, lo que garantiza una alta resistencia a



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

golpes térmicos. Los colectores solares de placas planas se describen como intercambiadores de calor que utilizan la radiación solar global (tanto directa como difusa) para calentar un fluido a temperaturas generalmente bajas (<373 K). Sus principales usos incluyen el calentamiento de agua, la climatización y procesos de secado en aplicaciones agrícolas e industriales (Forson et al., 2007).



**Ilustración 22:** Colectores solares térmicos de placa plana  
Fuente propia

De forma análoga, los colectores solares térmicos funcionan con el método de *concentración de calor*, el cual absorbe o refleja la mayor cantidad de radiación solar hacia

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

un punto en concreto. Los sistemas de concentración solar térmica (CST) emplean dispositivos ópticos, como espejos, junto con sistemas de seguimiento solar para enfocar una gran superficie de luz solar en un área receptora más reducida (Camacho et al., 2011). Para optimizar y aprovechar los momentos pico en radiación solar del día, se utilizan sistemas de colectores solares térmicos con abundantes placas, con el fin de abarcar un área más amplia, como el que se observa en la Ilustración 23, siendo un sistema compuesto por más de 40 colectores de placa plana.



**Ilustración 23:** Sistema de colectores solares térmicos de placa plana  
Fuente propia

Los colectores solares térmicos son una alternativa muy eficiente para un proceso de calentamiento de agua, sin embargo, poseen el inconveniente de que requieren que la radiación solar sea directa, ya que, en un clima con nubosidad densa, la radiación difusa no transfiere la suficiente energía para que el líquido sea calentado y, por lo tanto, no se aprovechan al máximo las cualidades del colector.

## 2.4 Modelado matemático y ecuaciones de bombas de calor y colectores solares

Para los cálculos se requieren diferentes ecuaciones termodinámicas. En primer lugar, el calor requerido para calentamiento de un volumen de agua parte del balance de primera ley de la termodinámica y se puede expresar como (Cengel et al., 2019)

$$\dot{Q} = \frac{\rho * V_T * C_P * (T_{final} - T_{inicial})}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

- $V_T$  es el volumen de agua dentro del tanque [m<sup>3</sup>]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- $t$  es el tiempo de calentamiento del agua [s]
- $C_p$  es el calor específico del agua [kJ/(kg.°C)]
- $\rho$  es la densidad del agua. [kg/m<sup>3</sup>]
- $T_{final}$  es la temperatura final del agua [°C]
- $T_{inicial}$  es la temperatura inicial o de suministro del agua [°C]
- $\Delta t$  Es la diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial [s]

Por otra parte, el cálculo del calor generado por los colectores solares debido a la irradiación solar es

$$\dot{Q}_{solar} = \frac{I_{rrad} * A}{t} \quad (2)$$

Donde:

- $I_{rrad}$  es la irradiación solar [Wh/m<sup>2</sup>]
- $A$  es el área del colector solar [m<sup>2</sup>]
- $t$  es el tiempo de calentamiento [h]

Para los cálculos del coeficiente de desempeño (COP) del sistema de bombas de calor, se requieren inicialmente una sumatoria de toda la potencia global del sistema, como se expresa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$P_{Total} = [(P_{compresor} + P_{Ventilador}) * \# \text{ bombas de calor}] + P_{Motobomba} \quad (3)$$

Donde:

- $P_{total}$  es la suma de todas las potencias del sistema [kW]
- $P_{compresor}$  es la potencia eléctrica del compresor [kW]
- $P_{Ventilador}$  corresponde a la potencia eléctrica del ventilador [kW]
- $P_{Motobomba}$  es la potencia eléctrica de la motobomba de recirculación [kW]

Para el cálculo del COP del sistema de bombas de calor, se utiliza la siguiente ecuación (Cengel et al., 2019):

$$COP = \frac{P_{Térmica}}{P_{Eléctrica}} \quad (4)$$

Donde:

- $P_{Térmica}$  es la potencia térmica que genera la bomba de calor [kW]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- $P_{Eléctrica}$  es la potencia eléctrica que consume el sistema de bombas de calor [kW]
- $COP$  es el coeficiente de rendimiento del sistema de bombas de calor.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

---

Luego de entender los elementos y sistemas presentados en el marco teórico, se procede con la metodología presentada en el siguiente orden:

#### 3.1 Caracterización de los sistemas actuales del Eco hotel Piedras Blancas

Inicialmente, se realizó una visita de validación de condiciones en el Ecohotel, donde se tomaron medidas de las diferentes zonas, realizando una valoración visual de los espacios disponibles, sistemas que requerían mantenimiento preventivo y correctivo, y demás datos relevantes, entre los que se encuentran:

**Toma de medidas:** Se realizó la toma de medidas de los diferentes espacios, contemplando las medidas de una bomba de calor estándar de 5 HP con diseño de ventilador centrífugo, la cual comúnmente tiene una medida de 0,85 m de ancho por 0,80 metros de profundidad y 2,00 metros de altura (contemplando la salida de su ducto de aire). Este tipo de bombas de calor tienen un diseño vertical, donde el evaporador se encuentra en la parte inferior de la estructura, por lo que se requiere un área despejada para un correcto flujo de aire.

Adicionalmente, se tomaron medidas de las diferentes tuberías existentes, donde se trazaron los diferentes circuitos hidráulicos y se valoraron las posibilidades de aprovechar esa misma tubería para ahorrar insumos y mano de obra, realizando diferentes tipos de By pass para poner en funcionamiento todos los elementos inoperativos que se encuentran en el Eco Hotel.

En el proceso de toma de medidas se tomaron imágenes generales del sitio, como se puede observar en la Ilustración 24:



**Ilustración 24:** Toma de medidas para posible ubicación de bombas de calor.  
Fuente propia

**Potencias disponibles:** Las bombas de calor al ser un sistema netamente eléctrico, requieren de una alimentación sólida que pueda soportar la demanda del sistema, donde las condiciones eléctricas del sistema propuesto se expresan en la Tabla 2:

**Tabla 2:** Condiciones eléctricas requeridas por una bomba de calor

Voltaje	208VAC-240VAC
Corriente	24A
Factor de potencia	0.85
Tipo de red	Monofásica

Fuente propia

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3.2 Diseño y análisis de un sistema de calentamiento a través de bombas de calor y colectores solares térmicos

Para alcanzar el segundo objetivo específico del trabajo se utilizaron diferentes métodos descritos a continuación:

- **Diseño:** Para los diseños hidráulicos se utilizó el software Visual Paradigm con el propósito de graficar el sistema que actualmente se tiene en el Eco Hotel Piedras Blancas, su funcionamiento, conexiones y cambios propuestos, donde se propone la integración de otros sistemas periféricos pertenecientes al hotel, pero que no tienen uso relevante.
- **Cálculos térmicos:** Se realizaron cálculos térmicos de forma manual y con la ayuda de software de propiedades termodinámicas como lo es el EES. Las ecuaciones utilizadas se presentaron en la sección 2.4 de este trabajo.
- **Cálculos eléctricos:** Se realizaron de forma manual y se presentan en la parte de resultados de este trabajo.

Adicionalmente, los datos obtenidos para las diferentes variables fueron consultados en bases de datos confiables e información suministrada por proveedores de alta calidad.

### 3.3 Comparación del sistema de calentamiento que actualmente posee el Eco Hotel Piedras Blancas, a través de gas, con el sistema propuesto

Para este objetivo, se consultó directamente al Ecohotel Piedras Blancas los costos asociados a la logística, consumo y demás variables que involucran el funcionamiento de la caldera de gas, con el propósito de generar un estimado de gastos mensuales y anuales en materia de calentamiento de agua. Dicho esto, se realiza una comparativa de los costos de mantenimiento del sistema de calentamiento de agua a través de caldera de gas, contra el sistema propuesto de calentamiento de agua a través de bomba de calor y colectores solares térmicos, generando conclusiones que permitan demostrar la viabilidad del sistema, tiempos de amortización y ahorros generados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización de los sistemas presentes en el Eco Hotel Piedras Blancas

El Eco hotel Piedras Blancas actualmente posee un sistema de climatización que consta de una caldera de gas, un tanque de acumulación de 5000 litros y un sistema de tuberías interconectadas que suministran agua caliente a 24 habitaciones, donde el agua caliente está disponible en los lavamanos y en las duchas. Adicionalmente, el tanque de acumulación suministra agua caliente a dos jacuzzis, de 3000 litros cada uno y, por último, al sistema de lavado de vajillas ubicado en la cocina del hotel.

**Caldera de gas:** Actualmente, el Eco Hotel Piedras Blancas posee una caldera de gas, el cual es de tipo GNL (Gas natural licuado), la caldera se puede observar en la Ilustración 25:



**Ilustración 25:** Caldera de gas presente en el Eco Hotel Piedras Blancas.  
Fuente propia

Dicha caldera es de marca Kastor, referencia 800, según el fabricante “Este es un equipo con capacidad de suministrar grandes cantidades de agua caliente con distintos fines, ya



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

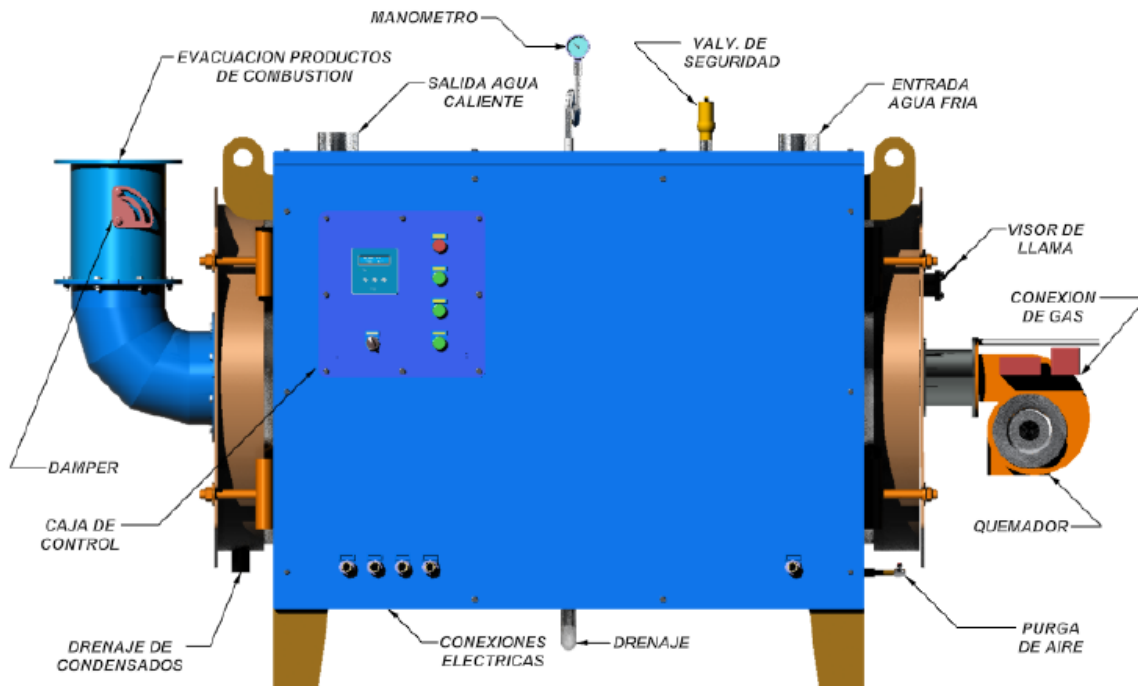
sea, por ejemplo, para abastecer duchas o para utilizar el agua como medio para transferir calor. Funciona mediante el sistema de calentamiento de agua con quemador atmosférico de alta eficiencia con capacidad de 800.000 btu/h y un acumulador en acero inoxidable”. La ficha técnica del equipo se presenta en la Tabla 3:

**Tabla 3:** Especificaciones técnicas de caldera de gas Kastor 800

<b>Flujo de agua caliente</b>	50 GPM
<b>Potencia máxima</b>	800.000 BTU/h
<b>Potencia mínima</b>	400.000 BTU/h
<b>Eficiencia</b>	>90%
<b>Presión máxima de agua</b>	10 Bar
<b>Tipo de gas</b>	GLP/GN
<b>Presión de gas nominal</b>	28 mbar GLP. 18 mbar GN
<b>Caudal de gas nominal</b>	22.6 m <sup>3</sup>
<b>Conexión de agua fría</b>	2"
<b>Conexión de agua caliente</b>	2"
<b>Espacio de instalación</b>	2.5 m <sup>3</sup>
<b>Suministro de energía</b>	220 V
<b>Controlador de temperatura</b>	Digital
<b>Evacuación de productos de combustión</b>	Tiro forzado
<b>Diámetro del ducto</b>	80"

Fuente: (Gas&Gas, 2024).

Se presenta el esquemático de partes de la caldera de gas Kastor 800:



**Ilustración 26:** Esquemático de partes de caldera Kastor 800.  
Fuente: (Gas&Gas, 2024)

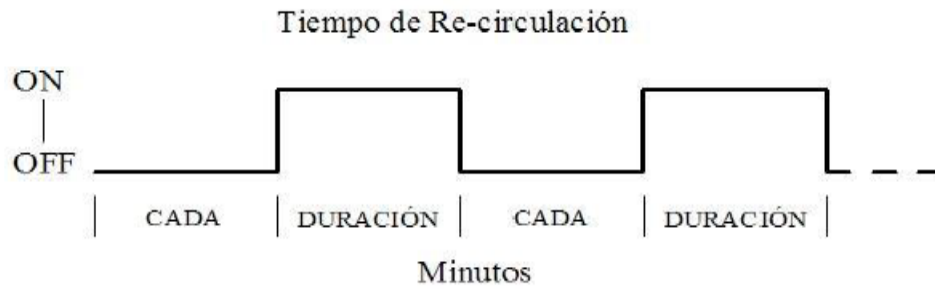
El sistema funciona bajo un control digital de temperatura, el cual se encarga de encender y apagar la caldera bajo una histéresis previamente configurada, las características técnicas del controlador de temperatura se presentan en la Tabla 4:

**Tabla 4:** Especificaciones técnicas de controlador de temperatura.

<b>Voltaje de Alimentación</b>	12V AC/DC (10.5-14.5V)
<b>Consumo</b>	200 mA (3W Max.)
<b>Temperatura</b>	1-140 °C
<b>Temporizador secuencial</b>	1-240 Minutos (4 hrs)
<b>Contactos de relevos</b>	20A 125V
<b>Sensor de temperatura</b>	Semiconductor LM35
<b>Dimensiones</b>	100mm, 100mm, 40mm

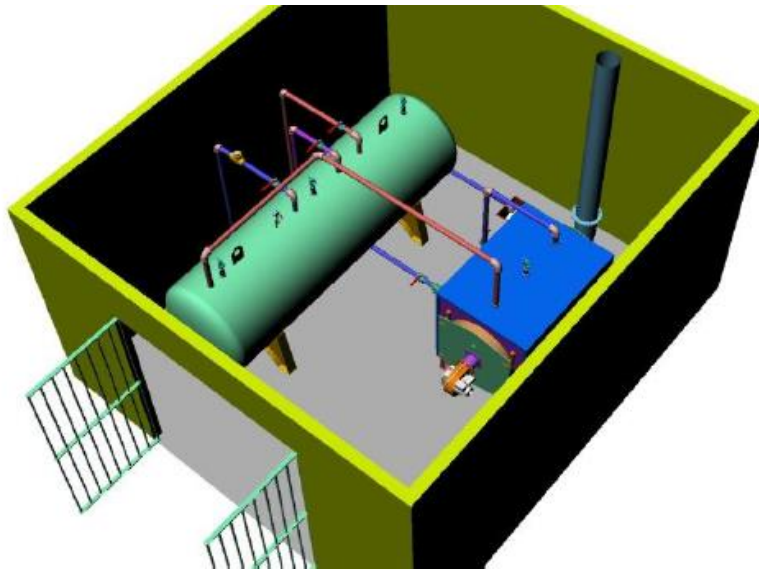
Fuente: (Gas&Gas, 2024)

Según los parámetros configurados en el Eco Hotel Piedras Blancas, el sistema funcionaba bajo un Set point de 60°C con histéresis de 2°C, es decir, si la temperatura del tanque desciende a 58°C, el sistema encenderá hasta que alcance una temperatura de 62°C. La secuencia de funcionamiento se presenta en la Ilustración 27:



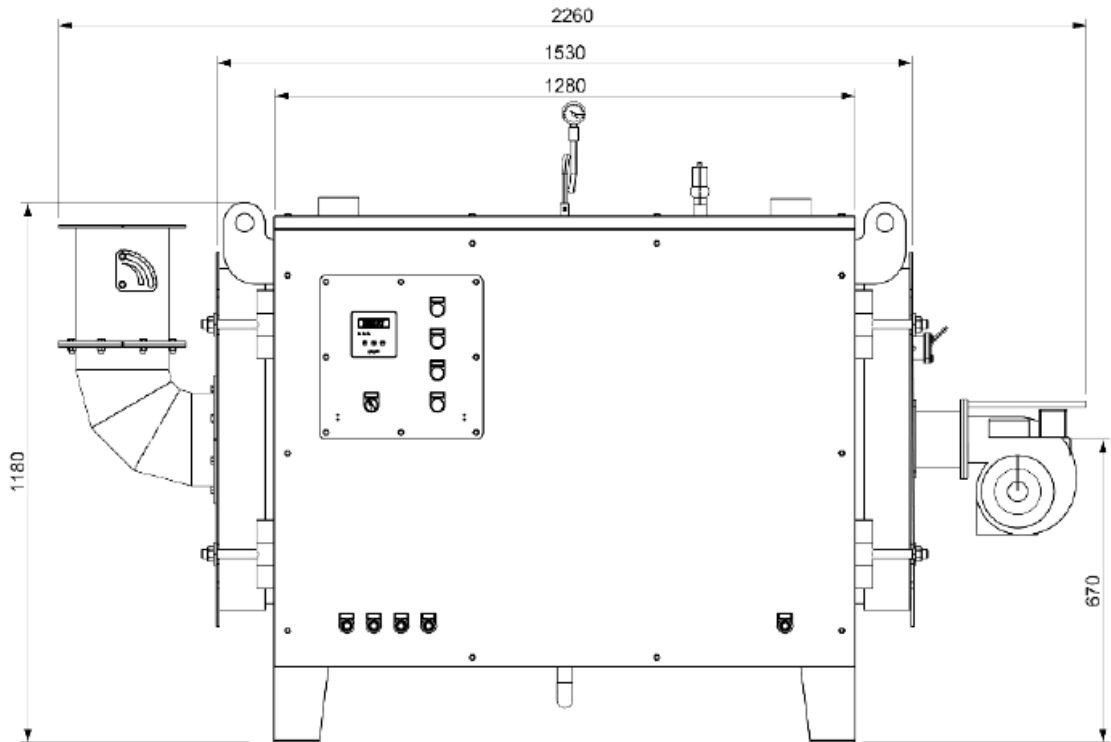
**Ilustración 27:** Secuencia de funcionamiento.  
Fuente: (Gas&Gas, 2024)

Teniendo en cuenta la histéresis de temperatura relativamente pequeña que tiene por configuración la caldera, el alto volumen de consumo de agua y la temperatura promedio de la zona, la caldera tiende a tener muchos ciclos de recirculación a lo largo del día, aumentando considerablemente el consumo de gas y, por ende, el costo de operación del sistema. Un ejemplo de esta instalación se presenta en la Ilustración 28:

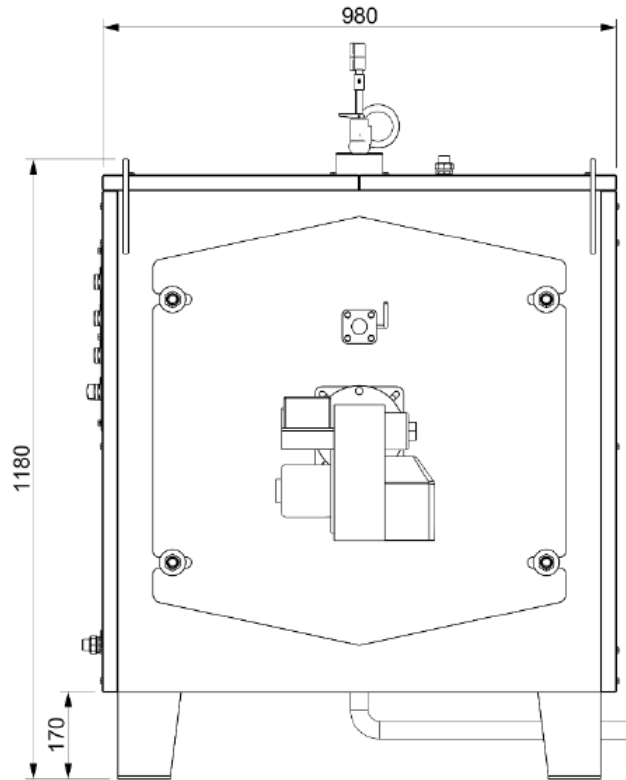


**Ilustración 28:** Ejemplo de instalación de caldera Kastor 800.  
Fuente: (Gas&Gas, 2024)

Las dimensiones de la caldera se presentan en las siguientes ilustraciones:

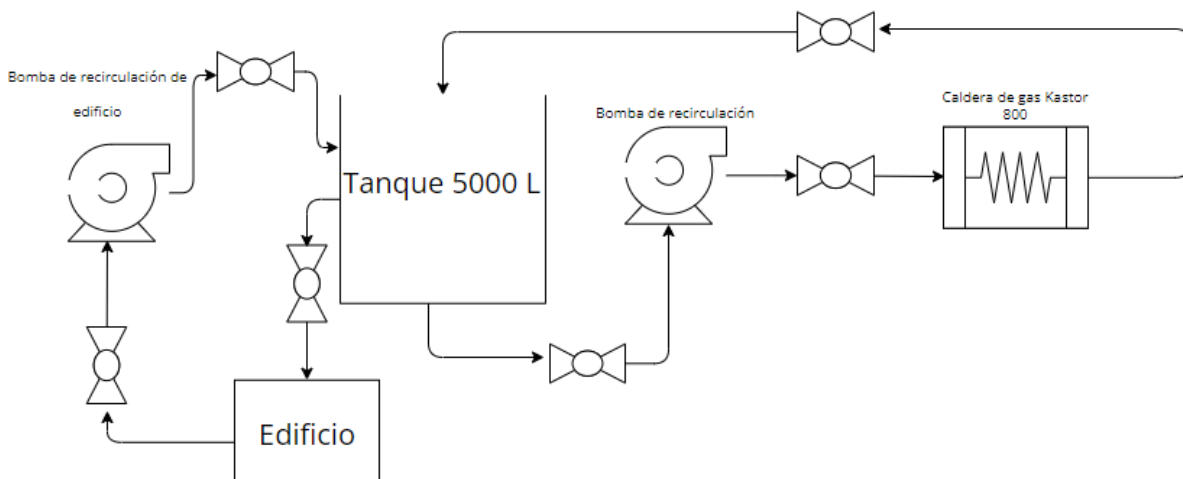


**Ilustración 29:** Vista lateral de caldera Kastor 800  
Fuente: (Gas&Gas, 2024)



**Ilustración 30:** Vista frontal de caldera Kastor 800.  
Fuente: (Gas&Gas, 2024)

El esquemático de conexiones hidráulicas presente en el Eco Hotel Piedras Blancas se observa en la Ilustración 31:



**Ilustración 31:** Esquemático hidráulico sistema de climatización de Eco Hotel Piedras Blancas.  
Fuente propia

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Como se puede observar, el sistema consta de dos bombas de recirculación, la primera (entre el tanque de acumulación y la caldera de gas), se encarga de extraer el agua de la parte baja del tanque (menor temperatura), e introducirla a la caldera de gas para su posterior calentamiento. La segunda bomba de recirculación se encarga de extraer el agua caliente del tanque de almacenamiento y recircularla por toda la edificación, donde se encuentran como consumo las 24 habitaciones, los dos jacuzzis y los lavavajillas de la cocina, manteniendo el agua en un rango entre 58°C a 62°C. Un ciclo de funcionamiento típico se describe a continuación:

- 1) La motobomba que está entre la caldera y el tanque recircula el agua fría con el propósito de que ésta se caliente hasta los 62°C, una vez alcanzada esta temperatura, la motobomba se detiene y la caldera se apaga.
- 2) El tanque se presuriza con la red de agua de suministro (usualmente 80 PSI).
- 3) El hotel comienza a tener consumos de agua en diferentes habitaciones, por lo que la motobomba de recirculación del edificio comienza su ciclo para garantizar la presión y temperatura en todo el sistema de tuberías.
- 4) El agua caliente comienza a ser consumida, por lo que la red de agua de suministro comienza a reponer el nivel del tanque, este suministro ingresa a una temperatura cercana a 12°C.
- 5) La temperatura del tanque empieza a decrecer (mezcla entre agua caliente y fría) hasta llegar a 58°C.
- 6) La motobomba de recirculación del tanque a la caldera nuevamente se enciende, posterior a este flujo, la caldera se enciende hasta que la temperatura del tanque alcance nuevamente los 62°C.

Este ciclo se repite según los consumos que se presenten en el hotel, donde influyen los siguientes eventos:

- Porcentaje de ocupación.
- Simultaneidad en el uso de las duchas (Horas pico).
- Temperatura ambiente.
- Pérdidas térmicas del sistema.
- Cantidad de llenados en los jacuzzis.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Adicionalmente, es importante mencionar que este es el único sistema que tiene el Eco Hotel Piedras Blancas para el calentamiento del agua, donde una falla en la caldera ocasionaría una detención total del suministro de agua caliente.

**Colectores solares térmicos:** El Eco Hotel Piedras Blancas posee un sistema inactivo de 34 colectores solares térmicos, los cuales van hacia un intercambiador de placas que entrega calor a una red de tuberías conectadas a un tanque inactivo de 7500 litros. Este sistema fue deshabilitado ya que no se lograron resultados efectivos en el calentamiento de dicho volumen, por lo que se optó por la compra de una caldera de gas y el tanque que actualmente se está utilizando (5000 litros). Los colectores solares presentes en el Eco Hotel Piedras Blancas se presentan en la Ilustración 32:



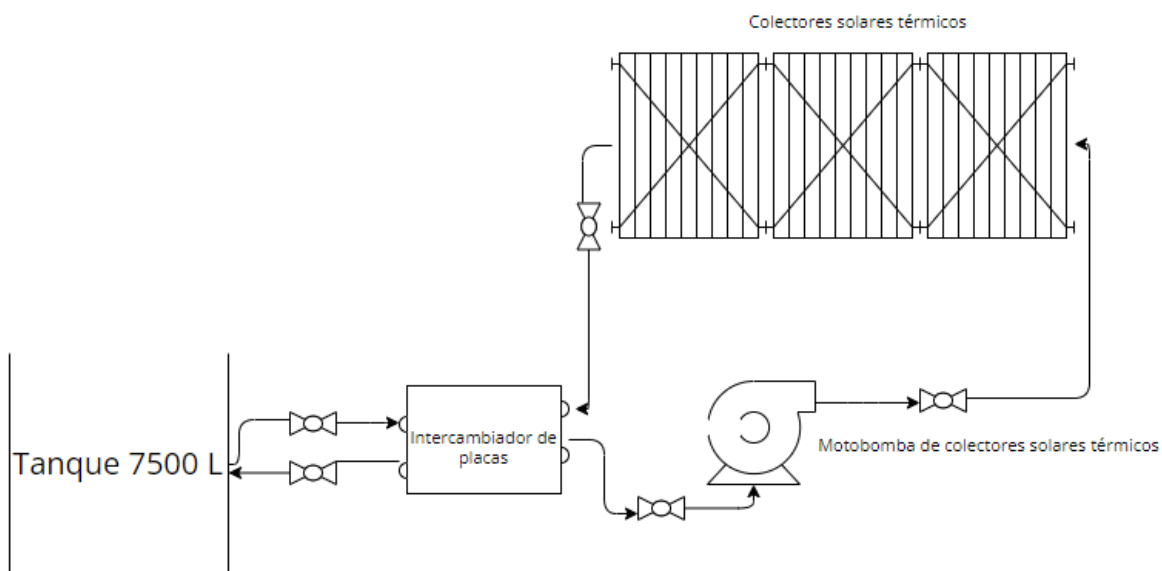
**Ilustración 32:** Colectores solares de placa plana en Eco Hotel Piedras Blancas  
Fuente propia

Como se mencionó anteriormente, el sistema de colectores solares entrega la energía absorbida a un intercambiador de placas, como el que se observa en la Ilustración 33:



**Ilustración 33:** Intercambiador de placas.  
Fuente propia

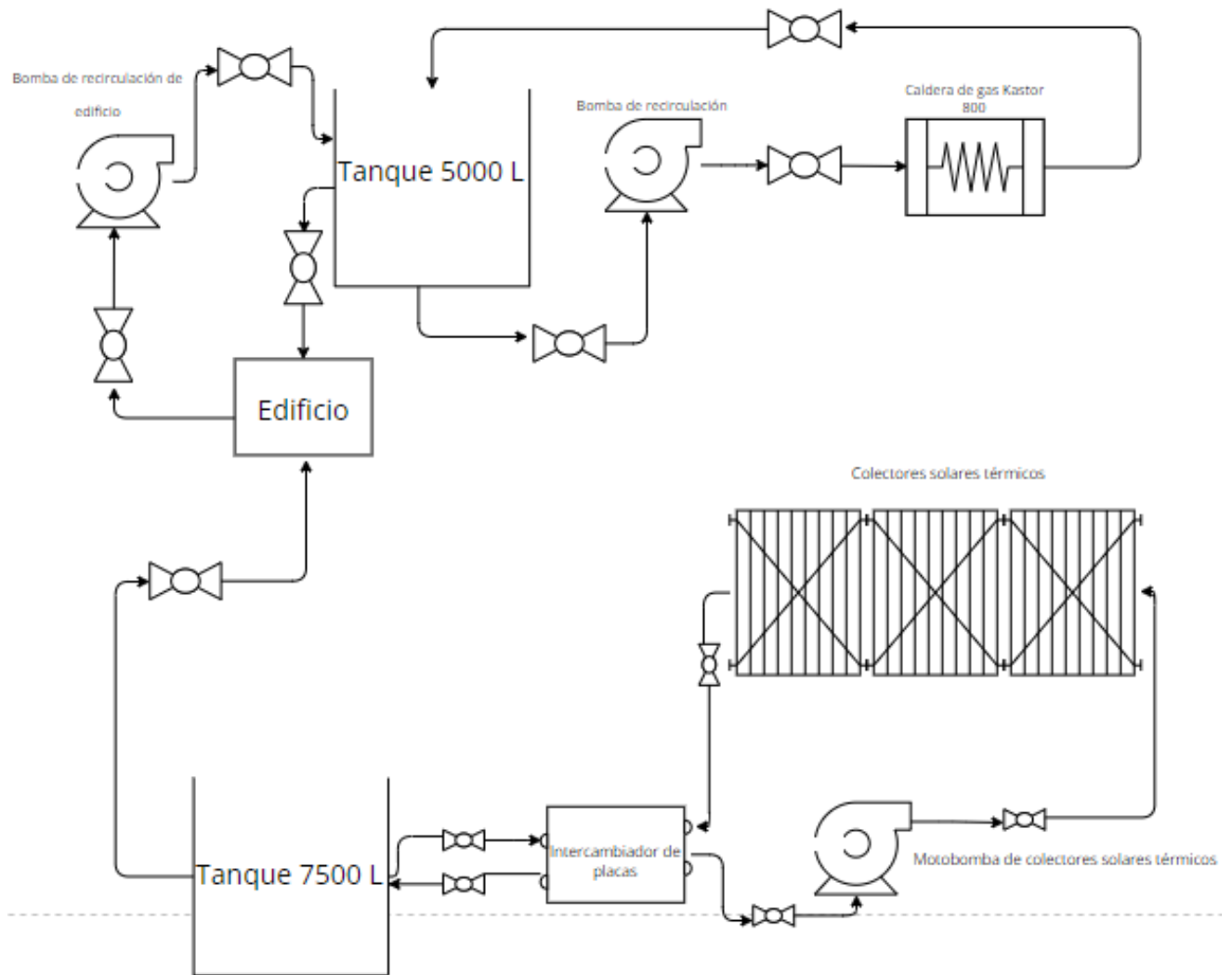
El intercambiador de placas recibe la energía absorbida por los colectores solares térmicos y lo transfiere hacia el agua del tanque de 7500, repitiendo el ciclo hasta que la temperatura SET sea alcanzada o si bien, la radiación no sea suficiente para seguir calentando el tanque. El esquemático hidráulico del sistema de colectores se presenta en la Ilustración 34:



**Ilustración 34:** Conexiones de los colectores solares térmicos.  
Fuente propia



Tanto el sistema hidráulico de la caldera de gas (Ilustración 31), como el sistema hidráulico de los colectores solares térmicos (Ilustración 34) se encuentran interconectados entre sí en ciertos puntos, como se puede ver en la Ilustración 35:



**Ilustración 35:** Conexión hidráulica de todo el sistema  
Fuente propia

Como se puede observar, la interconexión entre ambos sistemas está presente únicamente en las salidas de ambos tanques, donde dicha interconexión es el suministro de agua caliente que tiene dirección hacia el edificio. Como se había mencionado con anterioridad, el sistema de colectores térmicos solares permanece aislado del sistema de calentamiento a través de la caldera de gas, por lo cual, la válvula que interconecta el tanque de 7500 litros con el tanque de 5000 litros permanece cerrada.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4.2 Cálculos térmicos

### 4.2.1 Caldera de gas

Inicialmente, se realizan los cálculos térmicos del sistema que actualmente se tiene, donde el calor requerido para calentar un volumen de agua, para esto, se utiliza la ecuación 1 y los valores se obtienen en la siguiente tabla:

**Tabla 5:** Cálculos térmicos para caldera de gas.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen	$V_T$	5	$m^3$
Tiempo	T	1.19	h
Calor específico	$C_p$	4.18	$\text{kJ}/\text{kg} * K$
Densidad	$\rho$	1000	$\text{kg}/m^3$
Temperatura final	$T_{final}$	60	$^{\circ}C$
Temperatura inicial	$T_{inicial}$	12	$^{\circ}C$
Calor requerido	$\dot{Q}$	234.17	kW

Fuente propia

Según información proporcionada por el Eco Hotel Piedras Blancas, la caldera en cada ciclo de encendido funciona en su máxima capacidad, por lo tanto, para calentar un volumen de  $5m^3$  requiere un tiempo de 1.19 horas.

Según datos obtenidos de la UPME, el poder calorífico superior del GLP se encuentra en la tabla 6 (UPME, 2017), corresponde a 20856 BTU/lb y depende de la composición del combustible. El poder calorífico inferior para este combustible es de 19432.5 BTU/lb (UPME, 2016), el cual se utilizará para los cálculos, ya que la caldera actual no condensa los gases de combustión.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 6:** Composición del GLP

Mes	% C1 y C2	% C3	%C4	% C5 y +	Densidad R.	Densidad	P. Calor.	P. Calor.	P. Calor.
						kg/gal	(BTU/lb)	(BTU/kg)	(BTU/gal)
2005	0%	39%	60%	1%	0.56	2.1138	19,636	43,289	91,506
2006	1%	33%	66%	1%	0.56	2.1323	19,613	43,240	92,201
2007	0%	40%	59%	1%	0.56	2.1238	19,616	43,244	91,844
2008	1%	28%	71%	1%	0.57	2.1551	20,872	46,013	99,163
2009	0%	25%	74%	1%	0.57	2.1617	20,919	46,117	99,693
2010	0%	23%	76%	1%	0.57	2.1729	20,159	44,443	96,568
2011	1%	22%	76%	1%	0.57	2.1687	20,902	46,081	99,937
2012	0%	14%	85%	0%	0.58	2.1784	20,984	46,261	100,773
2013	2%	35%	63%	1%	0.57	2.1517	20,879	45,934	98,836
2014	0%	11%	88%	1%	0.58	2.1969	20,855	45,881	100,796
2015	2%	13%	85%	0%	0.58	2.1969	20,890	45,958	100,965
2016*	0%	15%	85%	1%	0.58	2.1970	20,856	45,883	100,805

Fuente: (UPME, 2017)

Considerando este dato y la eficiencia de la caldera expresada en la ficha técnica (90%), se tienen los siguientes resultados:

**Tabla 7:** Cálculo de calor producido por GLP

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Calor requerido	$\dot{Q}$	234.17	kW
Eficiencia	$\eta$	0.9	Adimensional
Calor producido por el combustible	$\dot{Q}_{combustible}$	260	kW

Fuente propia

Convirtiendo los kW a BTU/hora,  $\dot{Q}_{combustible} = 887674 \text{ BTU/hora}$

Teniendo en cuenta esto, se realiza la siguiente conversión con el propósito de obtener el consumo de GLP por cada hora de funcionamiento de la caldera:

$$887674 \frac{BTU}{hora} * \frac{1 \text{ lb}}{19432.5 \text{ BTU}} = 45.68 \frac{lb}{hora} \quad (5)$$

Esto quiere decir que, por cada hora de funcionamiento de la caldera de gas del Eco Hotel Piedras Blancas, se está consumiendo aproximadamente 45.68 libras de GLP.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

#### 4.2.2 Bomba de calor

Teniendo en cuenta estas condiciones presentadas anteriormente, se propone un sistema de dos bombas de calor donde el dimensionamiento térmico partirá desde la aplicación de la ecuación 1 y los valores se expresan en la siguiente tabla:

**Tabla 8:** Cálculos térmicos bomba de calor.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen	$V_T$	7.5	$m^3$
Tiempo	t	6	Horas
Calor específico	$C_p$	4.18	$kJ/kg * K$
Densidad	$\rho$	1000	$kg/m^3$
Temperatura final	$T_{final}$	50	$^{\circ}C$
Temperatura inicial	$T_{inicial}$	12	$^{\circ}C$
Calor requerido	$\dot{Q}$	55.15	kW

Fuente propia

Es importante mencionar que algunas variables del sistema cambiaron según las siguientes consideraciones:

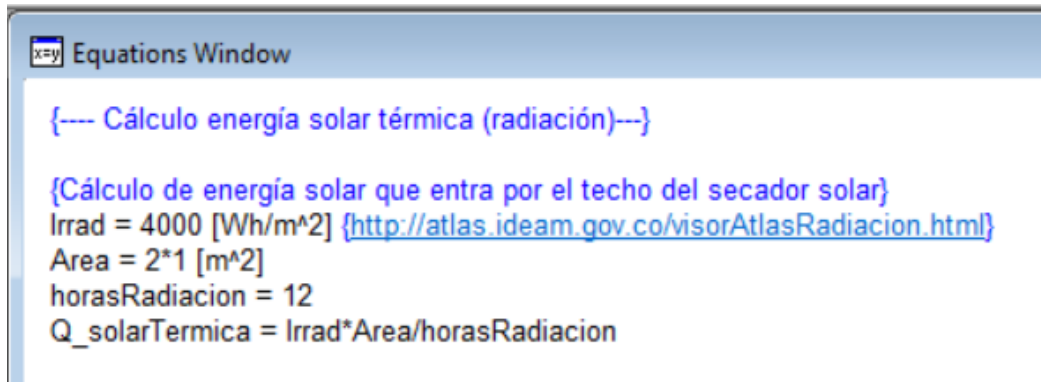
1. El volumen del tanque ya no será de  $5 m^3$ , sino que será de  $7.5 m^3$ , esto debido a que se pondrá en funcionamiento el tanque que está deshabilitado con el fin de poder almacenar la mayor cantidad de energía térmica posible.
2. La temperatura final ya no será de  $60^{\circ}C$  sino que será de  $50^{\circ}C$  esto debido a que según las condiciones climáticas de la ubicación del Eco Hotel Piedras Blancas,  $60^{\circ}C$  es exagerado para la sensación térmica que se le puede brindar al usuario, donde los jacuzzis y agua de las duchas normalmente oscilan entre  $40^{\circ}C$  y  $50^{\circ}C$ , este cambio reduce sustancialmente las pérdidas térmicas con el ambiente.
3. El tiempo de calentamiento cambia de 1.19 horas a 6 horas, esto debido a que, por solicitud del Eco Hotel Piedras Blancas, los tiempos de calentamiento deben recuperarse entre horas pico, como lo son las 6 AM, 12 PM, 6 PM y 12 AM.

El sistema propuesto por bombas de calor presenta una potencia térmica de 220.000 BTU/hora, compuesto por dos bombas de calor ( $220000 \text{ BTU/h} = 64.46 \text{ kW}$ ). Este sistema propuesto tiene la capacidad suficiente para abastecer la demanda solicitada ( $55.15 \text{ kW}$ ),

teniendo márgenes amplios de seguridad en caso de una sobredemanda térmica en el hotel, obteniendo factores de seguridad de alrededor del 15%.

#### 4.2.3 Colectores solares térmicos

Para los colectores solares térmicos, se realizaron los cálculos a través de EES, donde las variables declaradas se pueden ver en la Ilustración 36:



```

{--- Cálculo energía solar térmica (radiación)---}

{Cálculo de energía solar que entra por el techo del secador solar}
Irrad = 4000 [Wh/m^2] {http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html}
Area = 2*1 [m^2]
horasRadiacion = 12
Q_solarTermica = Irrad*Area/horasRadiacion
  
```

**Ilustración 36:** Variables declaradas en cálculo de potencia de colectores solares térmicos.  
Fuente propia

Según las variables declaradas, los valores obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

**Tabla 9:** Cálculos térmicos para colector solar

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Radiación	$Irrad$	4000	$Wh/m^2$
Área	$A$	2	$m^2$
Tiempo	$T$	12	Horas
Calor producido por colector solar	$Q_{solar}$	0.67	kW

Fuente propia



```

Solution
Main
Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg
Area = 2 [m^2]          horasRadiacion = 12
Irrad = 4000 [Wh/m^2]  Q_solarTermica = 666,7
  
```

**Ilustración 37:** Potencia de 1 colector solar térmico  
Fuente propia

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Como se puede observar, el calor que un colector solar térmico le entrega al sistema es de 0.67 kW, como el Eco Hotel Piedras Blancas posee 34, el calor total entregado por todo el sistema de colectores es:

$$\dot{Q}_{solar\ total} = 0.67\ kW * 34 = 12.58\ kW \quad (6)$$

### 4.3 Diseño de un sistema de bombas de calor y colectores solares térmicos

Para el sistema que actualmente se tiene en el Eco Hotel Piedras Blancas, se propone la reestructuración de las tuberías con el propósito de que el tanque de 7500 litros sea el principal, y el tanque de 5000 litros sea el respaldo, esto con el fin de que, al tener más capacidad volumétrica, se puede almacenar más energía térmica proveniente de los colectores solares térmicos y de la bomba de calor en momentos de bajo consumo de agua dentro de las instalaciones, con el fin de que en momentos de alta demanda (horas picos de baños, uso de jacuzzis, etc.) el sistema tenga la capacidad de solventar dichos consumos. Al ser indispensable el uso del agua caliente en el recinto, se propone que la caldera de gas pase a ser un sistema secundario dentro del conjunto bomba de calor-colectores solares térmicos, con el propósito de tener un respaldo en caso de apagones, malfuncionamiento del sistema, alta demanda de agua (por encima de lo esperado), y demás factores externos que puedan afectar el correcto desempeño del sistema.

Para el modelo propuesto, se presenta un conjunto de dos bombas de calor con potencia de 110.000 BTU/h cada una, esto con el fin de que el sistema encienda de una manera escalonada, según el consumo de agua del hotel, las características de cada bomba de calor se presentan en la Tabla 10:

**Tabla 10:** Características bomba de calor

<b>BOMBA DE CALOR</b>	
Potencia	110.000 BTU/h
Potencia eléctrica del compresor	5 HP
Potencia eléctrica del motor ventilador	3/4 HP
Tipo de red	Red monofásica 220V
Tipo de compresor	Scroll
Tipo de motor ventilador	Centrífugo
Tipo de gas refrigerante	R290
Presiones del sistema en succión	60 PSI
Presiones del sistema en descarga	180 PSI
Tipo de condensador	Convección forzada

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Material del condensador	Hierro
Control	Termóstato Fullgauge MT512

Fuente propia

**Compresor seleccionado:** Según las condiciones eléctricas presentes en el Eco Hotel Piedras Blancas, el tipo de red, la potencia requerida por cada máquina, se selecciona un compresor Copeland Scroll ZKR3-PFV, con los siguientes datos técnicos:

**Tabla 11:** Ficha técnica frigorífica del compresor

<b>Datos técnicos frigoríficos</b>
Evaporator Temp. (°F) 45.00-45.00
Condensing Temp. (°F) 130.00-100.00
Return Gas Temp. (°F) 65-65
Liquid Temp. (°F) 115-85
Capacity (Btu/hr) 55000-64500
Power (W): 4830-3320
EER (Btu/Wh): 11.40-19.40
Mass Flow (lbs/hr): 805-830
Current (Amps): 21.40-14.70

Fuente: (Compresores Copeland, 2024)

**Tabla 12:** Ficha técnica eléctrica del compresor

<b>Datos técnicos eléctricos</b>
LRA-High*(Amp): 148.0
MCC (Amps): 39.0
Type: Start Capacitor
Low MFD: 270.0
High MFD: 324.0
Volts: 330
Type: Run Capacitor
Low MFD: 80.0
Volts: 370

Fuente: (Compresores Copeland, 2024)

El compresor seleccionado se puede observar en la Ilustración 38:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



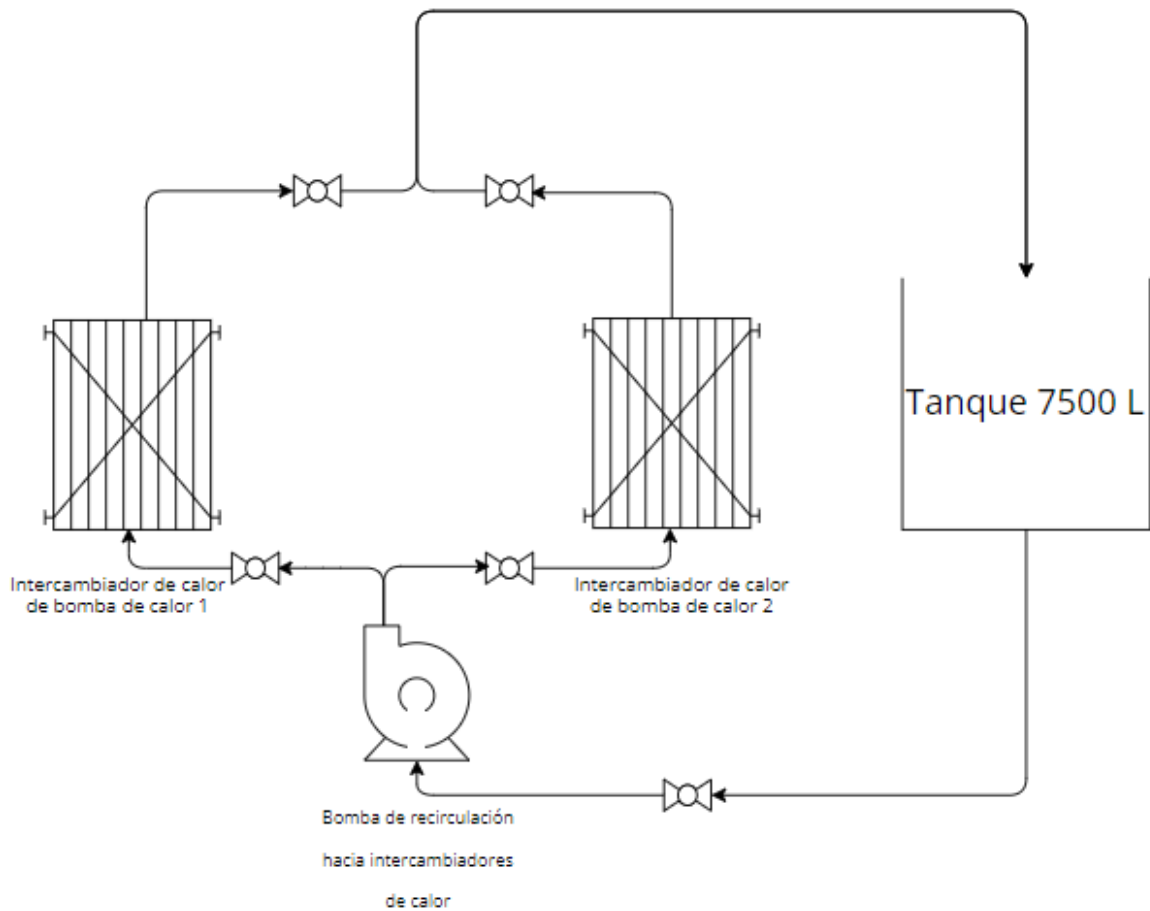
**Ilustración 38:** Compresor Copeland ZKR3-PF.  
Fuente: (Compresores Copeland, 2024)

Como anexo, el compresor por su compatibilidad en cuanto al aceite (mineral), presiones similares (60 PSI-180 PSI), su tipo de aplicación (Bomba de calor) y demás factores, permite el cambio de gas refrigerante por R290 con el debido proceso de adaptación, entre los que está el aislamiento del sistema eléctrico en cajas anti-explosión, la ubicación en un espacio aireado y demás factores importantes para la seguridad.

**Selección del sistema de bombeo:** Como se mencionó anteriormente, la bomba de calor tendrá un intercambiador de calor de tipo convección forzada, por lo que se requiere una motobomba que funcione en todo momento en que el sistema este encendido, con el fin de extraer el agua fría del tanque, recircularla por el intercambiador de calor, y posteriormente regresarla al tanque por la parte superior. Para la selección de la motobomba, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- **Alto caudal:** El bombeo debe ser con un caudal suficiente para abastecer dos bombas de calor, esto debido a que los intercambiadores de calor tendrán una configuración paralela, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**





**Ilustración 39:** Configuración de bomba de recirculación para los intercambiadores de calor.  
Fuente propia

- **Alta presión y resistencia:** Como el tanque está presurizado a 60 PSI (presión de suministro de agua por parte del proveedor), la motobomba debe tener la capacidad de vencer dicha presión. Adicional a la presión, el cuerpo de la bomba debe de ser resistente a altas temperaturas, ya que materiales como el PVC, plásticos, pastas y demás carcasas comunes en los sistemas de recirculación se deforman a temperaturas superiores a los 50°C.

Para el sistema de recirculación, se presenta la motobomba Pedrollo CP660M, la cual se muestra en la siguiente ilustración:



**Ilustración 40:** Motobomba Pedrollo CP660M.  
Fuente: (Pedrollo, 2024)

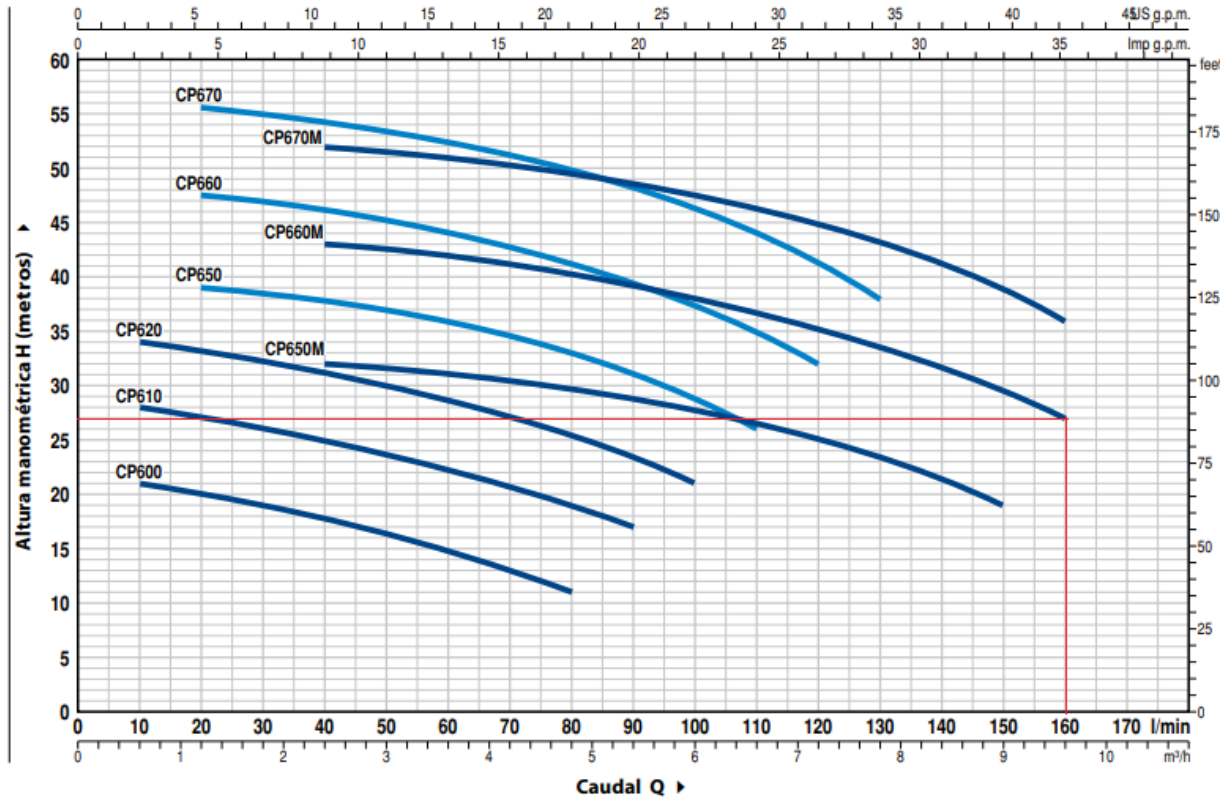
Las características se presentan a continuación:

**Tabla 13:** Ficha técnica de motobomba Pedrollo CP660M.

Modelo	CP660M
Potencia	1.5 kW
Caudal máximo	160 L/min
Altura máxima	56 m
Presión máxima en el cuerpo de la bomba	10 bar
Tipo de alimentación	220 V
Tipo de red	Monofásica

Fuente (Pedrollo, 2024)

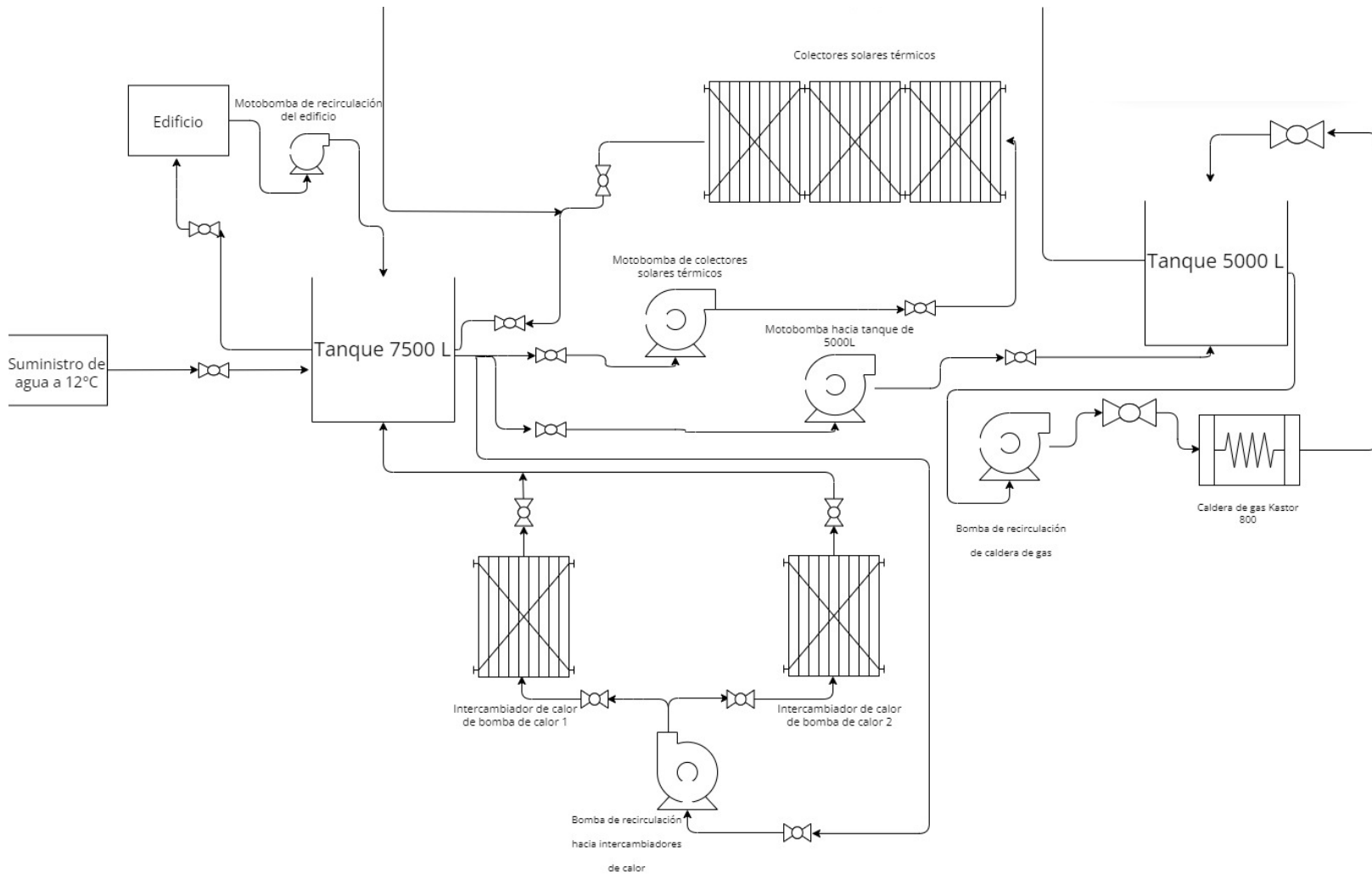
La curva de caudal y presión se encuentra en la Ilustración 41:



**Ilustración 41:** Curva de caudal vs altura manométrica.  
Fuente: (Pedrollo, 2024)

Para el caso de aplicación en el Eco Hotel Piedras Blancas, la altura de bombeo es mínima ya que los intercambiadores de calor estarían contiguos a la descarga de la motobomba, por lo cual, el caudal será el máximo disponible.

Entendiendo esto, el sistema propuesto se encuentra en la Ilustración 42:



**Ilustración 42:** Esquema propuesto.  
Fuente propia

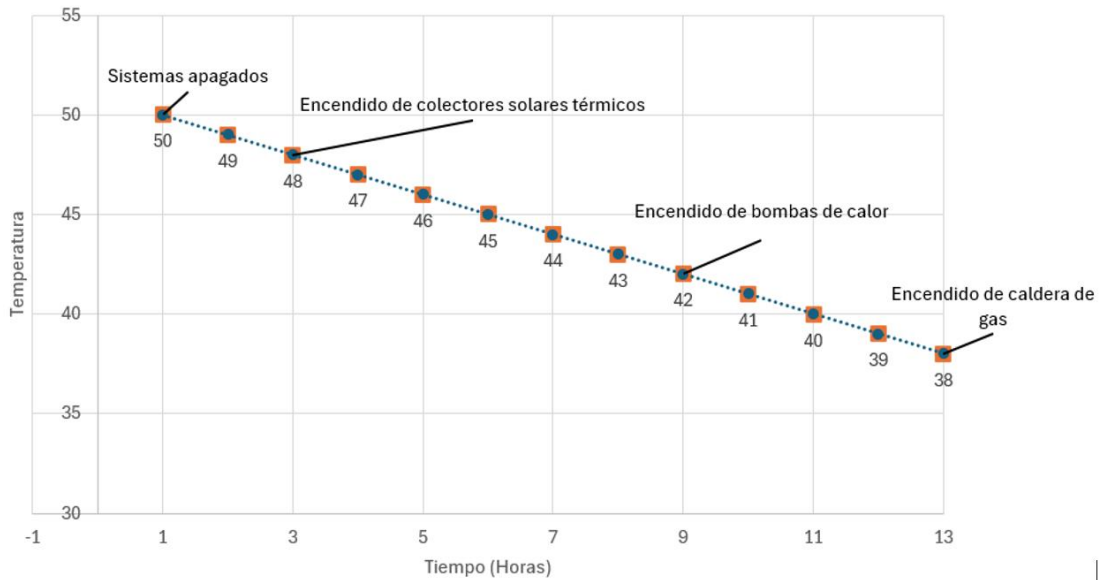
Este esquema permite una integración de todos los sistemas existentes en el Eco Hotel Piedras Blancas con la siguiente prioridad:

**Tabla 14:** Jerarquía de operación

<b>Sistema primario</b>	Bombas de calor
<b>Sistema de apoyo</b>	Colectores solares térmicos
<b>Sistema de respaldo</b>	Caldera de gas

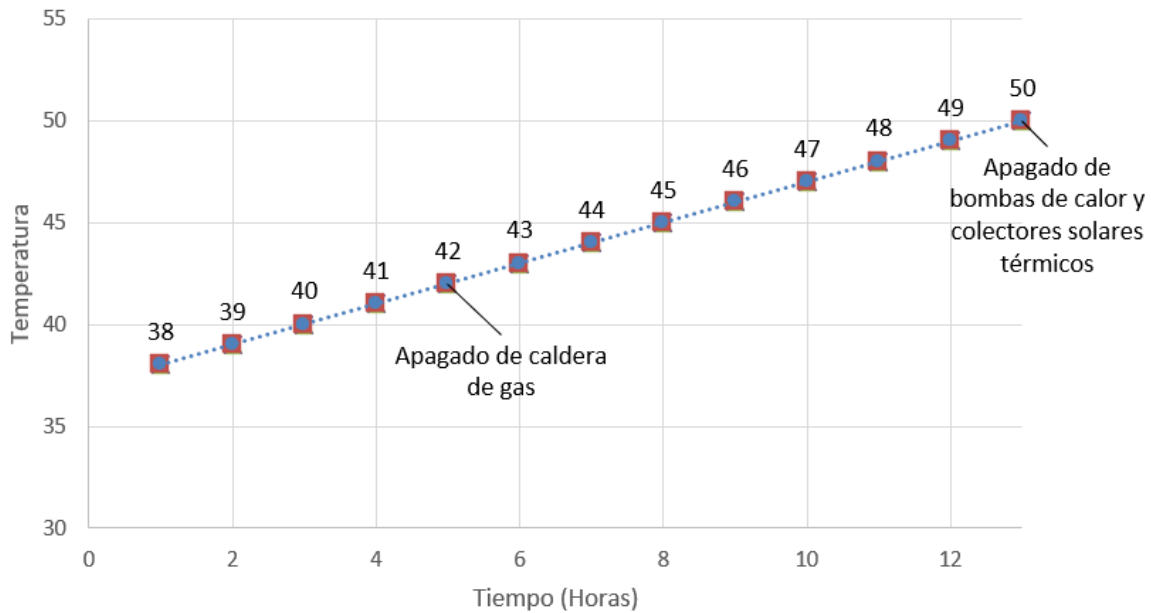
Fuente propia

En un día de alta demanda de agua, el sistema globalizado tendría el siguiente comportamiento:



**Ilustración 43:** Comportamiento del sistema en alta demanda de agua  
Fuente propia

El sistema tendrá un ascenso en temperatura a medida que la demanda de agua disminuya, apagándose progresivamente con el propósito de tener un ahorro energético, como se expresa en la siguiente ilustración:



**Ilustración 45:** Comportamiento del sistema en momentos de baja demanda de agua.  
Fuente propia

Como se puede observar, el sistema globalizado a medida que empieza a subir la temperatura del tanque se apaga progresivamente con el propósito de no tener excesos de consumo en momentos que no tienen alta demanda de agua caliente en el hotel, dejando que los sistemas primarios de la calefacción, que son las bombas de calor y los colectores solares térmicos, sean los encargados en la mayoría del tiempo para subir la temperatura del tanque.

**Cálculo del COP del sistema de bombas de calor:**

La potencia total del sistema se expresa en la siguiente tabla:

**Tabla 15:** Cálculo de potencia eléctrica total del sistema de bombas de calor.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia del compresor	$P_{compresor}$	5	HP
Potencia del ventilador	$P_{ventilador}$	0.75	HP

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Potencia de la motobomba	$P_{Motobomba}$	2	HP
Cantidad de bombas de calor	No aplica	2	Adimensional
Potencia eléctrica total del sistema de bombas de calor	$P_{total}$	13.5	HP

Fuente propia

Convirtiendo la potencia de HP a kW,  $13.5 \text{ HP} = 10.06 \text{ kW}$ . Con estos datos, se puede calcular el COP del sistema, como se ve a continuación:

**Tabla 16:** Cálculo de COP del sistema de bombas de calor.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia térmica del sistema de bomba de calor	$P_{Térmica}$	64.46	kW
Potencia eléctrica total del sistema de bombas de calor	$P_{Eléctrica}$	10.06	kW
Coefficiente de rendimiento	COP	6.4	Adimensional

Fuente propia

Esto quiere decir que por cada kilovatio eléctrico que el sistema consumo, genera 6.4 kW térmicos.

#### 4.4 Comparación entre el sistema que actualmente tiene el Eco Hotel Piedras Blancas y el propuesto

Según los datos calculados, el sistema de caldera de gas genera un consumo de GLP de 45.68 libras por cada hora de funcionamiento. El sistema de bombas de calor demanda una potencia de 10.06 kW. Se tiene la siguiente comparación:

**Tabla 17:** Comparativa de costos de operación.

<b>Comparativo de consumos</b>		
	<b>Caldera de gas</b>	<b>Bombas de calor</b>
Potencia	800000 BTU/h	220000 BTU/h
Consumo por hora	45.68 lb/hora	10.06 kWh
Tiempo de funcionamiento por cada ciclo de calentamiento	1.19 horas	6 horas
Cantidad de ciclos por día	2	2
Volumen calentado	5000 litros	7500 litros
Precio de consumo	2234.9 pesos/lb	955.89 pesos/hora
Consumo total por día	108.71 libras	120.72 kWh
Consumo total mensual	3261.55 libras	3621.6 kWh
Costo total de operación mensual	\$ 7 289 242	\$ 3 461 851

Fuente propia

Los precios del GLP y el kilovatio eléctrico fueron obtenidos directamente del tarifario de servicios públicos. Como se puede observar, la implementación del sistema de bombas de calor permite ahorros en el costo de operación de \$3 827 391 mensuales, alrededor del 52%, siendo un sistema altamente eficiente en términos monetarios.

Según cotizaciones obtenidas por varias empresas, el costo de un sistema de dos bombas de calor con las especificaciones requeridas está en promedio en 35 millones de pesos, el cálculo de amortización simple se realiza según la siguiente ecuación:

$$Amortización = \frac{Costo\ de\ adquisición}{Ahorros\ del\ sistema/mes} \quad (7)$$

$$Amortización = \frac{\$35\ 000\ 000}{\$3\ 827\ 391} = 9.14\ meses \quad (8)$$



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Según lo calculado, el sistema se pagaría en su totalidad en un plazo alrededor de nueve meses, generando a partir de ese punto ganancias monetarias que pueden ser invertidas en nuevos proyectos.

Respecto al impacto ambiental de ambos sistemas se tiene la siguiente comparativa:

**Tabla 18:** Comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub>

<b>Comparativo de emisiones de CO<sub>2</sub></b>		
	<b>Caldera de gas</b>	<b>Bombas de calor</b>
Potencia	800000 BTU/h	220000 BTU/h
Consumo por hora	45.68 lb/hora	10.06 kWh
Tiempo de funcionamiento por cada ciclo de calentamiento	1.19 horas	6 horas
Cantidad de ciclos por día	2	2
Consumo diario	108.71 libras	120.72 kWh
Consumo mensual	3261.55 libras	3621.6 kWh
Volumen calentado	5000 litros	7500 litros
Emisión de CO <sub>2</sub>	1.417 kgCO <sub>2</sub> /lb	0.126 kgCO <sub>2</sub> /kWh
Emisión total diaria	154.05 kgCO <sub>2</sub>	15.21 kgCO <sub>2</sub>
Emisión total mensual	4621.61 kgCO <sub>2</sub>	456.32 kgCO <sub>2</sub>

Fuente: (UPME, 2016)

Como se puede observar, las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente tienen una reducción aproximada del 90%, donde la quema de 3261.55 libras de GLP emite mensualmente 4621.61 kg de CO<sub>2</sub>, respecto al sistemas de bombas de calor, donde la emisión de CO<sub>2</sub> para los 3621.6 kWh consumidos es de 456.32 kg.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1 Conclusiones

Se diseñó un sistema de calentamiento de agua a través de bombas de calor y colectores solares térmicos, con el propósito de reemplazar en el futuro la caldera de gas ubicada en el Eco Hotel Piedras Blancas, donde se cumple satisfactoriamente la demanda térmica generada por los diferentes procesos internos del hotel, sustentados a través de diferentes cálculos térmicos, eléctricos y de COP, visualizando un ahorro energético efectivo, contribuyendo adicionalmente a la descarbonización de sistemas de calentamiento masivos, donde se logra una reducción cercana al 90% en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Se realiza la comparación monetaria entre la operación de un sistema de calentamiento a través de caldera de gas, contra el sistema de calentamiento a través de bombas de calor y colectores solares térmicos, evidenciando un ahorro monetario cercano al 52% en costos energéticos, ya que la operación mensual de la caldera de gas y de la bomba de calor son de \$7'289.242 y \$3'461.851 respectivamente, evidenciando un rendimiento energético superior, siendo sustentados a través de cálculos matemáticos y diferentes referencias monetarias en el mercado en términos de precio de servicios públicos.

### 5.2 Recomendaciones

Se recomienda en un futuro el cambio de red eléctrica, adecuando un sistema trifásico, esto debido a que el sistema al manejar una tercera línea demanda un amperaje inferior, disminuyendo el estrés eléctrico que se le pueda generar a las líneas de alimentación.

Se recomienda la adición de más colectores solares térmicos, esto con el propósito de poder captar más radiación solar, ya que, al contribuir más al almacenamiento térmico, las bombas de calor se encenderán menos tiempo, permitiendo una maximización en el ahorro.

### 5.3 Trabajo futuro

Con las políticas ambientales cada vez más estrictas a lo largo de los años, se hace necesaria la integración de nuevas tecnologías para el reemplazo de sistemas altamente contaminantes como lo son las calderas de gas, donde la bomba de calor entra como

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

reemplazo de sistemas de climatización de tanque de acumulación, sistemas de deshumidificación, calefacciones domésticas y demás procesos térmicos que involucren la quema de combustibles fósiles. Se requiere el desarrollo de nuevos gases refrigerantes cada vez más amigables con el medio ambiente, con alta capacidad de transmisión de temperatura y a bajas presiones, con el propósito de reducir las corrientes del compresor, y, por ende, el consumo eléctrico global de la bomba de calor.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## REFERENCIAS

---

- Braungardt, S., Tezak, B., Rosenow, J., y Bürger, V. (2023). Banning boilers: An analysis of existing regulations to phase out fossil fuel heating in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113442>
- Camacho, E. F., Del Real, A. J., Bordons, C., y Arce, A. (2011). Solar thermal plants integration in smart grids. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 44(1 PART 1), 4939–4944. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02791>
- Cengel, Y. A., Kanoglu, M., y Boles, M. A. (2019). *Termodinámica: Un enfoque práctico* (9a ed.). McGraw-Hill Education.
- Compresores Copeland. (2024). *Ficha técnica del Compresor Copeland Scroll ZR40K3-PFV*. <https://compresorescopeland.com/producto/compresor-copeland-scroll-zr40k3-pfv/>
- Danfoss. (2024). *AKVP – Válvula de expansión electrónica para la industria de distribución alimentaria* [Imagen]. Danfoss. <https://www.danfoss.com/es-mx/products/dcs/valves/electric-expansion-valves/akv-electric-expansion-valves/akvp-electric-expansion-valve/>
- Dong, S., Zhao, H., Zheng, Y., y Ni, L. (2023). Carbon reduction analysis of electric heat pumps in carbon neutrality in China. *Sustainable Cities and Society*, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104758>
- El Samad, T., Żabnieńska-Góra, A., Jouhara, H., y Sayma, A. I. (2024). A review of compressors for high temperature heat pumps. In *Thermal Science and Engineering Progress* (Vol. 51). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102603>
- Forson, F. K., Nazha, M. A. A., Akuffo, F. O., & Rajakaruna, H. (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy*, 32(14), 2306–2319. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.003>
- Gas&Gas. (2024). *Caldera Kastor 800* [Imagen]. En *Catálogo General Caldera Kastor 800*.
- Hosseini, S. M., Rashidi, S., Hsu, S. H., Yan, W. M., & Rashidi, A. (2024). Integration of solar thermal collectors and heat pumps with thermal energy storage systems for building energy demand reduction: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112568>
- Intergas. (2019). *Calderas de condensación: elegir bien* [Imagen]. Intergas. <https://www.intergas.es/consumer/2019/03/11/calderas-de-condensacion-elegir-bien/>

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- IPR Partes y Repuestos. (2024). Compresor scroll AA R410 [Imagen]. IPR Partes y Repuestos.  
<https://iprpartesyrepuestos.com/producto/copelad-compresor-scroll-aa-r410/>
- Jaber, M. W. K., Güngör, A., Canli, E., Abdulkarim, A. H., & Sentürk, U. (2024). Transient evolution of thermal stratification and passive flow guidance inside a heat exchanger immersed thermal energy storage tank. *Journal of Energy Storage*, 88.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111472>
- Kijo-Kleczkowska, A., Bruś, P., & Więciorkowski, G. (2023). Economic analysis of heat pump exploitation – A case study. *Energy*, 280, 128184.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128184>
- Li, R., Wang, Z., Zhang, Y., Li, Z., Luo, X., Lu, W., & Gu, Z. (2024). Performance improvement of vapor compression heat pump with superhydrophobic finned-tube evaporator. *Journal of Building Engineering*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109013>
- Sánchez García Dirigida por, D., & Ramón Cabello López Enrique Torrella Alcaraz, D. D. (2024). TESIS DOCTORAL.
- Shin, J., Park, T., Cho, H., Yoo, J., Moon, S., & Lee, C. (2023). Theoretical and experimental study of waste-heat-recovery boiler with water injection. *Heliyon*, 9(9).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19417>
- Sogecal. (2024). Caldera pirotubular: fabricantes e instaladores de calderas industriales de vapor. Sogecal. <https://sogecal.com/servicios/caldera-pirotubular-fabricantes-instaladores-calderas-industriales-vapor/>
- Sun, Y., Li, D., Ji, J., & Hua, Z. (2024). Numerical analysis on heat transfer performance of spiral elastic copper tube heat exchanger with helical defectors. *Applied Thermal Engineering*, 248.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123298>
- Officine Mario Dorin Spa. (2024). Compresor frigorífico semihermético HEP6 series [Imagen]. DirectIndustry. <https://www.directindustry.es/prod/officine-mario-dorin-spa/product-17608-1975572.html>
- Pedrollo. (2024). Electrobombas centrífugas.  
[https://www.pedrollo.com.co/public/allegati/CP%200.37-2.2%20kW\\_ES\\_60Hz.pdf](https://www.pedrollo.com.co/public/allegati/CP%200.37-2.2%20kW_ES_60Hz.pdf)
- UPME (2017). Cadena del gas licuado del petróleo (GLP).  
[https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Cadena\\_GLP\\_2017\\_30032017.pdf](https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Cadena_GLP_2017_30032017.pdf)
- UPME (2016). Calculadora de emisiones.  
[http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/calculadora.html](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Wang, H., Jin, D., Liu, X., & Zhang, C. (2022). Analytical and numerical investigations on the high temperature upgrading solution of subcritical boilers. *Applied Thermal Engineering*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117628>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES

*Julian R*

*Andrés Sanabria S.*

FIRMA ASESOR

*José Luis...*

Segunda entrega de informe final de trabajo de grado para su evaluación

FECHA ENTREGA: 2024/10/29 6:00 pm