

**EVALUACION DEL IMPACTO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR POR TUBOS  
DE CAMBIO DE FASE SOBRE EL RENDIMIENTO ENERGETICO APLICADO EN UN  
SISTIMA DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR**

**DANIEL ALEJANDRO VILLEGAS VALLEJO**

**ASESOR**

**ARLEY SALAZAR HINCAPIE**

**INGENIERO MECÁNICO**

**I.U PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TECNOLOGÍA MECANICA INDUSTRIAL**

**MEDELLÍN**

**2023**

**EVALUACION DEL IMPACTO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR POR TUBOS  
DE CAMBIO DE FASE SOBRE EL RENDIMIENTO ENERGETICO APLICADO EN UN  
SISTIMA DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR**

**DANIEL ALEJANDRO VILLEGAS VALLEJO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNOLOGO MECÁNICO  
INDUSTRIAL**

**I.U PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA MECANICA INDUSTRIAL**

**MEDELLÍN**

**2023**

## RESUMEN

La conciencia ambiental y el ahorro de energía son temas muy importantes en la actualidad ya que hay un alto crecimiento en la tasa de natalidad de la población mundial, el crecimiento de los países en desarrollo, el consumo de energía, y el calentamiento global.

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor cada día son más implementados en el uso residencial y de oficinas, generando un mayor consumo de energía. Para mitigar este consumo energético, se implementó intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase como una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia energética de dicho sistema.

Se conectó el sistema de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase al sistema de compresión de vapor mediante dos líneas de fluido: una que transportaba el fluido a los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase y otra que devolvía el fluido al sistema.

Se tomaron mediciones de temperatura en diferentes puntos del sistema, como la salida del compresor, la entrada y salida de los intercambiadores, la entrada del condensador, la zona entre el capilar y el evaporador, y la salida del evaporador. Estas mediciones permitieron evidenciar los cambios de temperatura, las cuales se vieron reflejadas en una mejora de la carga térmica del equipo al reducir la temperatura del refrigerante a la entrada del condensador.

Sin embargo, se observó una variación en la capacidad de enfriamiento de forma positiva. Hubo un aumento en la potencia, probablemente porque el compresor debe trabajar más para superar esta resistencia y mantener el flujo adecuado del refrigerante a través del sistema. No obstante, el Coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del sistema de refrigeración con los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase indicó una mejora.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>GLOSARIO Y ACRONIMOS.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>11</b>
Pregunta de investigación .....	13
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>15</b>
Objetivos específicos.....	15
<b>MARCO TEORICO .....</b>	<b>16</b>
<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>25</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>34</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
<b>ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>51</b>

## GLOSARIO Y ACRONIMOS

**PCM:** Phase Change Material (Material de Cambio de Fase).

**HFC:** Hydrofluorocarbon (Hidrofluorocarbono).

**CO<sub>2</sub>:** Carbon Dioxide (Dióxido de Carbono).

**GWP:** Global Warming Potential (Potencial de Calentamiento Global).

**PCG:** Potencial de Calentamiento Global.

**AIE:** Agencia Internacional de Energía.

*W:* Potencia de refrigeración o capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración.

*COP<sub>R</sub>:* Coeficiente de rendimiento.

*QH:* Calor eliminado en el compresor.

*Ql:* Calor adsorbido por el evaporador.

*m:* Flujo másico del refrigerante

**CSU:** Condensing Unit (Unidad de Condensación).

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Compresor .....	20
Ilustración 2. Condensador .....	21
Ilustración 3. Capilar .....	22
Ilustración 4. Evaporador .....	22
Ilustración 5. Válvula de corte .....	23
Ilustración 6. Manómetro .....	23
Ilustración 7. Filtro .....	24
Ilustración 8. Banco con intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase .....	32
Ilustración 9. Intercambiador de calor .....	33
Ilustración 10. Intercambiador de calor .....	33
Ilustración 11. Banco de refrigeración. ....	34
Ilustración 12. Sólido, banco de refrigeración. ....	35
Ilustración 13. Planos de diseño. ....	35
Ilustración 14. Banco de refrigeración. ....	36
Ilustración 15. Banco de refrigeración con intercambiador. ....	37
Ilustración 16. Pinza amperimétrica .....	38
Ilustración 17, Termómetro de pinza. ....	38
Ilustración 18. Lectura de temperatura. ....	39
Ilustración 19. Ciclo de refrigeración. ....	41
Ilustración 20. Diagrama de Mollier. ....	47

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Medición banco de refrigeración .....	43
--	----

## TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Carga térmica .....	39
Ecuación 2. Trabajo realizado .....	39
Ecuación 3. Coeficiente de rendimiento .....	40
Ecuación 4. Flujo masico de compresor.....	40
Ecuación 5. Flujo Volumétrico .....	41

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial es un factor importante para considerar en la discusión sobre la demanda energética. A medida que la población aumenta, también lo hace la demanda de energía para satisfacer las necesidades de transporte, iluminación, calefacción y refrigeración, entre otros usos. Esto puede tener un impacto significativo en los recursos naturales, la calidad del aire y el cambio climático (Darmstadter 2004).

En este contexto, es importante que se tomen medidas para fomentar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía en todos los sectores, desde el hogar hasta la industria y el transporte. Además, es importante impulsar el desarrollo de tecnologías limpias y renovables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el impacto ambiental de la demanda energética (Sánchez Peña 2012).

La investigación ha demostrado que una forma efectiva de mejorar la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado es a través de la tecnología de intercambiadores de calor en tuberías. Estos dispositivos permiten una transferencia de calor más eficiente y se utilizan ampliamente en una variedad de industrias y aplicaciones (Juengjaroennirachon et al. 2017).

Al-Ajmi y Zubair (2019), evaluaron un intercambiador de calor de materiales de cambio de fase (PCM) para aplicaciones de enfriamiento. Encontraron que el uso de PCM mejoró significativamente la eficiencia del sistema de aire acondicionado, disminuyendo el consumo de energía en un 25% en comparación con los sistemas convencionales (Faraj et al. 2019)

Cao et al. (2020) desarrollaron un intercambiador de calor de aire refrigerado con PCM para sistemas de aire acondicionado y encontraron que este sistema mejoró la eficiencia en un 40% en comparación con los sistemas convencionales (Radomska et al. 2020)

Existen varias formas de mejorar la eficiencia de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase en un sistema de refrigeración por compresión de vapor, entre ellas se pueden mencionar:

Selección adecuada de materiales de cambio de fase: La selección adecuada de materiales de cambio de fase es clave para mejorar la eficiencia de los intercambiadores de tubos de fase.



Se deben elegir materiales que tengan una alta capacidad de almacenamiento de energía térmica y una temperatura de fusión adecuada para la aplicación específica.

Diseño del intercambiador de calor: El diseño del intercambiador de calor es otro factor importante que afecta su eficiencia. Se debe diseñar el intercambiador de manera que permita una transferencia de calor adecuada entre el fluido y el material de cambio de fase.

Control adecuado del flujo de aire: El control adecuado del flujo de aire a través del intercambiador de calor por tubos de cambio fase también es importante para mejorar su eficiencia. Se debe asegurar que el flujo de aire sea uniforme y que el intercambiador esté ubicado en una posición adecuada para maximizar la transferencia de calor.

Control de temperatura: El control de la temperatura en el intercambiador de calor por tubos de cambio fase también es importante para mejorar su eficiencia. Se debe asegurar que la temperatura del fluido y el material de cambio de fase se mantengan dentro de los rangos adecuados para maximizar la transferencia de calor.

Los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase son dispositivos que se utilizan en sistemas de refrigeración y en otros procesos que requieren la transferencia de calor entre dos fluidos. Estos intercambiadores utilizan el principio de la transferencia de calor por cambio de fase, lo que significa que aprovechan la evaporación y la condensación de un fluido para transferir calor.

En el caso de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, estos constan de varios tubos en los que circula un fluido, que generalmente es agua la cual se somete a un proceso de vacío para que su punto de ebullición se encuentre por debajo de la temperatura del refrigerante que circula por las tuberías. De esta manera el agua se evapora en la parte caliente del tubo y se condensa en la parte fría, transfiriendo calor al fluido que circula por la carcasa.

Este proceso de transferencia de calor por cambio de fase es muy eficiente, ya que el calor latente de vaporización se utiliza para transferir grandes cantidades de calor con una pequeña diferencia de temperatura. Además, el uso de intercambiadores de tubos de fase permite reducir la cantidad de refrigerante necesaria en el sistema de refrigeración, lo que contribuye a hacer el sistema más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como sistemas de refrigeración de aire acondicionado, sistemas de refrigeración de procesos industriales, sistemas de calefacción y enfriamiento de edificios, entre otros. Son una tecnología madura y bien establecida en la industria de la refrigeración y el aire acondicionado, y se espera que su uso siga creciendo en el futuro debido a su eficiencia y capacidad para reducir el impacto ambiental.

Dados los comentarios anteriores y en busca de una solución al consumo energético en el presente trabajo se realizó la implementación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, entre la salida del compresor y entre la entrada del condensador; con el que se busca la disminución en el trabajo del compresor realizando el mejoramiento de la eficiencia energética en el sistema de refrigeración, ya que hay una pérdida de calor al pasar entre los tubos de fase los cuales al contacto con la tubería que transporta el refrigerante absorben energía térmica generando que el refrigerante llega al condensador a menor temperatura. Esto se hace posible ya que la tubería que entrelaza los tubos de fase es de cobre flexible un material con una buena conductividad térmica haciendo que el agua que se encuentra dentro de los tubos de fase con vacío se caliente y pueda absorber dicha energía térmica, generando que el refrigerante pierda calor y esto se verá reflejado en las temperaturas que se tomaran a la entrada de condensador. Se realizaron pruebas a un sistema de refrigeración por compresión de vapor el cual cuenta con un compresor de  $1/2$  HP con la aplicación del intercambiador y sin la aplicación del intercambiador, donde se encontró que la temperatura a la entrada del condensador sin la aplicación del intercambiador es de  $102.7^{\circ}\text{C}$  y con la aplicación de intercambiador es de  $76.2^{\circ}\text{C}$  haciendo que pierda una carga térmica de  $26.5^{\circ}\text{C}$

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la última década se ha planteado el concepto de ahorro de energía debido a las preocupaciones ambientales convirtiéndose en uno de los temas principales debido al calentamiento global y basados en las recientes crisis energéticas, la alta tasa de consumo global de energía en la aplicación para hogares, oficinas, y en la industria, en los cuales se emplean sistemas de refrigeración tipo mini Split.

De acuerdo con datos de la Agencia Internacional de Energía – AIE (2020), la demanda mundial de energía primaria se ha duplicado desde 1971 hasta el año 2020, y se espera que aumente en un 25% adicional para el año 2040. Esto se debe en gran parte al aumento de la población mundial y al creciente desarrollo económico en países en desarrollo (Energy Agency 2020).

El informe de la AIE sobre el futuro de la refrigeración en un mundo cálido menciona que la demanda de refrigeración está aumentando rápidamente en Asia, particularmente en China, India y el sudeste asiático. Esto podría indicar que estos países tienen un alto consumo de energía en sistemas de refrigeración en general, incluidos los sistemas de refrigeración mini Split (Turner, Staino, y Basu 2017).

Los sistemas de refrigeración emiten gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. El refrigerante más comúnmente utilizado en sistemas de refrigeración, el hidrofluorocarbono (HFC), tiene un potencial de calentamiento global mucho mayor que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Además, las fugas de refrigerante durante la vida útil del equipo también contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, los sistemas de refrigeración son responsables de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (International Energy Agency, 2018).

Varios países han implementado políticas y medidas para mejorar la huella de carbono de los sistemas de refrigeración, entre ellas se encuentran:

- Fomento de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración y aire acondicionado, mediante la implementación de estándares mínimos de eficiencia energética y etiquetado de eficiencia energética en los equipos.

- Transición hacia refrigerantes de menor impacto ambiental, como los refrigerantes naturales, a través de la eliminación progresiva de los refrigerantes con alto Potencial de Calentamiento Global (PCG) como el R-22 y el R-410A.
- Fomento de la recuperación, reciclaje y destrucción de los gases refrigerantes, para evitar su liberación a la atmósfera.
- Promoción de tecnologías de enfriamiento alternativas, como la refrigeración evaporativa y la refrigeración por absorción, que utilizan menos energía y tienen un menor impacto ambiental.

Algunos ejemplos de países que han implementado estas medidas son la Unión Europea, Japón, Estados Unidos, Australia y México, entre otros.

La huella de carbono en el sector de refrigeración ha estado creciendo en los últimos años, aunque no hay una cifra exacta que indique cuánto ha crecido. Sin embargo, hay estudios que señalan que el uso de sistemas de aire acondicionado y refrigeración se está incrementando a nivel mundial debido al aumento de las temperaturas y al mayor acceso a estos sistemas en países en desarrollo. Esto ha llevado a un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la huella de carbono asociada a la refrigeración (International Energy Agency 2018).

Teniendo presente los comentarios anteriores se instaló un intercambiador de calor por tubos de cambio de fase ya que puede mejorar el consumo energético en un sistema de refrigeración por compresión de vapor al aumentar la eficiencia del intercambio de calor entre el refrigerante y el medio ambiente. Los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase utilizan la vaporización y condensación del refrigerante en los tubos para transferir calor, lo que puede mejorar la eficiencia energética del sistema de refrigeración y reducir el consumo de energía eléctrica. Además, el uso de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase puede reducir la cantidad de refrigerante necesaria en el sistema, lo que a su vez reduce la emisión de gases de efecto invernadero; También es importante considerar el uso de refrigerantes con un menor impacto ambiental, como los HFC de bajo potencial de calentamiento global o alternativas más sostenibles como los refrigerantes naturales.

El sistema de refrigeración por compresión de vapor trabajaría con refrigerante R134 debido a que es un HFC utilizado en sistemas de aire acondicionado y refrigeración, y

es conocido por su bajo potencial de agotamiento de la capa de ozono y bajo potencial de calentamiento global en comparación con otros refrigerantes como el R-22.

Es considerar el desarrollo del sistemas de aire acondicionado desde la perspectiva de energía reducida, bajo dicha razón se plantea la aplicación de un intercambiador de calor por tubos de fase, donde se evidencie una disminución en la temperatura del refrigerante al momento de ingresar al condensador, ya que esto se podría ver reflejado la capacidad de trabajo generando un ahorro en el consumo energético, esto aplicando un cambio de temperatura en el refrigerante que se encuentra en la entrada del condensador.

Basado en los datos anteriores se genera la siguiente hipótesis en la cual se plantea que la implementación de un sistema intercambiador de calor por tubos de fase aplicado para sistema de refrigeración tipo de refrigeración por compresión de vapor disminuirá el trabajo del compresor basados en un bajo consumo energético lo cual haría que este trabaje por ciclos de tiempo más reducidos.

***Pregunta de investigación:*** ¿La adaptación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase en un sistema de refrigeración por compresión de vapor, instalando entre el compresor y el condensador, puede generar una variación térmica en la temperatura del refrigerante que ingresara al condensador?

## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el concepto de ahorro de energía es un tema que ha ganado mucha fuerza ya que debido a el que aumento en las problemáticas ambientales y la alta tasa que se presenta frente al calentamiento global. El ahorro de energía se puede lograr mediante la mejora de la tasa de transferencia de calor y la optimización de las propiedades de transporte de fluidos y las características de flujo de refrigerantes. La implementación y mejora del sistema permitirá reducir los costos energéticos y contribuirá a una mayor sostenibilidad ambiental.

La instalación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase en un sistema de refrigeración por compresión de vapor puede aumentar la eficiencia y disminuir el consumo energético. Esto se debe a que al mejorar la refrigeración y disminuir la temperatura del refrigerante, se reduce el trabajo del compresor y se ahorra energía. Sin embargo, es importante destacar que la magnitud de la reducción en el costo dependerá de diversos factores, como el tamaño y la eficiencia del sistema de refrigeración, el uso y la ubicación, entre otros. Por lo tanto, se requiere un estudio detallado para determinar con precisión la reducción en los costos energéticos.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el impacto de intercambiadores de calor por tubos de cambio fase sobre el rendimiento energético aplicado en un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

### ***Objetivos específicos***

- Diseñar intercambiadores de calor por tubos de cambio fase aplicado en un sistema de refrigeración por compresión de vapor.
- Evaluar la variación de la temperatura del refrigerante a la entrada del condensador con la implementación de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase.
- Analizar la eficiencia energética del sistema antes y después de la instalación de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase aplicado en un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

## MARCO TEORICO

El concepto de ahorro de energía ha recibido una atención considerable en la investigación en los últimos años, debido a que las preocupaciones ambientales se han convertido rápidamente en temas principales como resultado del calentamiento global. Las recientes crisis energéticas han significado que todos deben considerar activamente la necesidad de ser eficientes en el uso de la energía (Sánchez Peña 2012). Hay muchas razones para buscar el ahorro de energía en los sistemas de aire acondicionado, incluida la conciencia ambiental cada vez más frecuente, la tasa global acelerada de consumo de energía, con una demanda particular de energía eléctrica para uso general residencial y de oficinas, y el cumplimiento de los requisitos ambientales (Darmstadter 2004).

La teoría que gira en torno a los sistemas de refrigeración por compresión de vapor se basa en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, que es el principio fundamental detrás de la mayoría de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado utilizados en hogares, edificios comerciales e industriales.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor consta de varios componentes clave, que incluyen un compresor, un condensador, una válvula de expansión sin embargo en el presente proyecto se utilizó un capilar el cual cumple la misma función, y un evaporador. El refrigerante, que es una sustancia que tiene una temperatura de ebullición baja, se utiliza para extraer el calor del entorno y enfriar el espacio.

El proceso comienza con el refrigerante en estado gaseoso a baja presión en el evaporador. A medida que absorbe el calor del entorno, se evapora y se convierte en vapor de baja presión y temperatura. El compresor aspira este vapor y lo comprime, aumentando su temperatura y presión.

El vapor comprimido y caliente se dirige al condensador, donde cede calor al medio circundante (por lo general, el aire o agua). A medida que el vapor se enfría, se condensa nuevamente en estado líquido de alta presión.

El refrigerante líquido de alta presión pasa a través de una válvula de expansión, que reduce su presión abruptamente. Esto provoca una caída de temperatura y, en consecuencia, una mezcla de líquido-vapor a baja presión.



Finalmente, la mezcla de líquido-vapor se dirige de nuevo al evaporador, donde absorbe el calor del entorno y se evapora nuevamente, reiniciando el ciclo.

Este proceso de compresión, condensación, expansión y evaporación se repite continuamente para mantener el ciclo de refrigeración en funcionamiento y proporcionar la refrigeración deseada en el espacio.

Es importante destacar que existen diferentes refrigerantes utilizados en los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, y cada uno tiene sus propiedades específicas en términos de eficiencia, impacto ambiental y seguridad. (Çengel y Boles 2012)

Para medir los parámetros más relevantes se debe tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

*Ecuación 1. Carga térmica*

$$Ql = m(h_1 - h_4)$$

*Ecuación 2. Trabajo realizado*

$$W = m(h_2 - h_1)$$

*Ecuación 3. Coeficiente de rendimiento*

$$COP_R = \frac{Ql}{W}$$

*Ecuación 4. flujo masico de compresor*

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{V}}{v_g} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

*Ecuación 5. Flujo Volumétrico*

$$\dot{V} = \frac{c.c * N * rpm}{100^3 * 60} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Una revisión de estudios previos indica que los investigadores han tendido a considerar el desarrollo de sistemas de aire acondicionado desde la perspectiva de energía reducida, esto en busca de mitigar el impacto ambiental tomando como referencia a Stoecker y Jones (1982) describen detalladamente el ciclo de refrigeración por

compresión de vapor que se utiliza en los sistemas de aire acondicionado y en las aplicaciones de refrigeración (Stoecker 1982). El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el principio básico detrás de la mayoría de los sistemas de aire acondicionado modernos. Este ciclo se basa en la capacidad de un fluido refrigerante para cambiar de fase de líquido a gas y de gas a líquido al absorber y liberar calor. El ciclo consta de cuatro procesos principales: compresión, condensación, expansión y evaporación (Juan Manuel Franco Lijó 2006).

En el proceso de compresión, el refrigerante se comprime mediante un compresor, lo que aumenta su temperatura y presión. Luego, el refrigerante se condensa a través del intercambio de calor con el aire exterior o con un intercambiador de calor. A medida que el refrigerante se condensa, libera calor y cambia de fase de gas a líquido. El refrigerante líquido se expande a través de una válvula de expansión, lo que disminuye su presión y temperatura. Esto permite que el refrigerante líquido pase a través del evaporador y cambie de fase de líquido a gas. En el evaporador, el refrigerante absorbe calor del aire ambiente o del líquido que se está enfriando, enfriando así el espacio o el líquido. Finalmente, el refrigerante gaseoso se comprime de nuevo, completando el ciclo. El proceso se repite continuamente para mantener el aire acondicionado o la aplicación de refrigeración en funcionamiento (Juan Manuel Franco Lijó 2006).

Los tubos de calor de cambio de fase se basan en el principio de transferencia de calor por cambio de fase y pueden utilizarse para transferir calor de una fuente a otra. En general, un tubo de calor consta de un tubo sellado, una cantidad de líquido de trabajo al vacío. Cuando una de las extremidades del tubo se calienta, el líquido de trabajo se evapora y se convierte en vapor, el cual fluye hacia la otra extremidad del tubo, donde se condensa y libera el calor absorbido. La estructura de mecha ayuda a transportar el líquido de trabajo hacia la zona de evaporación, mientras que la presión en el interior del tubo se mantiene baja para permitir la evaporación a baja temperatura (San, Lin, y Pai 2009).

Los tubos de cambio de fase se utilizan comúnmente en aplicaciones donde es necesario transferir calor de una fuente a otra de manera eficiente, como en sistemas de refrigeración y enfriamiento de electrónica, sistemas de calefacción y refrigeración de edificios, sistemas de energía solar y sistemas de almacenamiento de energía térmica.

Por estas razones, la tecnología de tubos de calor se ha utilizado ampliamente en forma de dispositivos de transferencia de calor y se ha llevado a cabo una investigación considerable (Chaudhry, Hughes, y Ghani 2012).

El intercambio de calor se produce mediante tubos de cambio de fase y tuberías de cobre, los cuales están en contacto directo y en un número de vueltas específicas según el diseño o fabricante. El objetivo de esta investigación fue implementar un intercambiador de calor por tubos de cambio fase para medir la temperatura del refrigerante en la entrada del condensador y su variación térmica. Esto implicó realizar modificaciones en el sistema de refrigeración, creando una vía secundaria entre el compresor y el condensador, donde una vía tiene un trayecto directo entre el compresor y el condensador, mientras que la otra pasa a través de los intercambiadores de calor mediante tubos de cambio de fase. Esto es posible gracias a un conjunto de válvulas de corte para abrir o cerrar el paso del refrigerante y de esta forma modificar la trayectoria, lo que permite medir el cambio de temperatura y determinar si es positivo o negativo, lo cual es crucial para evaluar la viabilidad del sistema. El refrigerante que se emplea es el R-134a debido a su seguridad, eficiencia y cumplimiento de los estándares ambientales. Su uso contribuye a un funcionamiento óptimo y sostenible de los sistemas de refrigeración en diversas aplicaciones (Çengel y Boles 2012).

Estas son algunas de sus características:

Algunas de las características y propiedades del R-134a incluyen:

- Punto de ebullición a presión atmosférica:  $-26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Punto de rocío:  $-15.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura crítica:  $100.6\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Presión crítica:  $40.6\text{ bar}$
- Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP): 0
- Inflamabilidad: no inflamable a temperatura ambiente y presión atmosférica
- Toxicidad: bajo nivel de toxicidad
- Es incoloro y sin olor
- No es tóxico
- Tiene un bajo potencial de agotamiento de ozono
- Tiene un potencial de calentamiento global (GWP) moderado

Además, tiene un punto de ebullición bajo y una presión de vapor alta en comparación con otros refrigerantes, lo que lo hace adecuado para su uso en sistemas de refrigeración de alta eficiencia; sin embargo, es importante tener en cuenta que, aunque el R-134a tiene un bajo GWP, todavía tiene un impacto significativo en el calentamiento global y se están desarrollando refrigerantes con GWP aún más bajos para reducir el impacto ambiental de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

**Compresor:** en un sistema de aire acondicionado es un componente esencial que se encarga de comprimir y bombear el refrigerante a través del sistema. Funciona tomando el refrigerante en estado gaseoso y lo comprime en un estado de alta presión y temperatura, luego lo bombea a través del sistema de refrigeración.

El compresor está ubicado en la unidad exterior de los sistemas de aire acondicionado y se encarga de circular el refrigerante a través de todo el sistema para llevar a cabo el proceso de refrigeración. Al comprimir el refrigerante, el compresor aumenta la temperatura y la presión del gas refrigerante, lo que lo convierte en un refrigerante de alta presión y temperatura. Este refrigerante caliente es luego transportado a través del sistema a la unidad interior, donde pasa a través del evaporador y se enfría, produciendo aire frío que se distribuye en la habitación (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 1. Compresor  
Elaboración propia del autor*

**Condensador:** componente que se encarga de transferir el calor del refrigerante al medio ambiente. En un sistema de aire acondicionado, el condensador se encuentra en la unidad exterior y es responsable de disipar el calor absorbido en el proceso de enfriamiento.

El condensador es un intercambiador de calor que tiene una serie de tubos a través de los cuales circula el refrigerante en estado gaseoso y una serie de aletas de enfriamiento que disipan el calor hacia el aire exterior. Cuando el refrigerante en estado gaseoso fluye a través del condensador, el calor se transfiere desde el refrigerante hacia las aletas, y luego hacia el aire circundante. Como resultado, el refrigerante se condensa y se convierte en un líquido de alta presión y temperatura, que luego es enviado al compresor para reiniciar el ciclo de refrigeración (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 2. Condensador*

*Elaboración propia del autor*

**Capilar:** en un sistema de refrigeración es un componente que se utiliza en algunos sistemas de refrigeración para controlar el flujo del refrigerante. El capilar es un tubo estrecho y largo que se encuentra en el circuito de refrigeración y que está diseñado para restringir el flujo del refrigerante.

El capilar se encuentra ubicado entre el condensador y el evaporador, y su función es reducir la presión del refrigerante y limitar la cantidad de refrigerante que se puede mover a través del sistema (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 3. Capilar*  
*Elaboración propia del autor*

**Evaporador:** es un componente que se encarga de absorber el calor del ambiente y transferirlo al refrigerante. El evaporador es el componente responsable de enfriar el aire en un sistema de aire acondicionado y se encuentra en la unidad interior del sistema (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 4. Evaporador*  
*Elaboración propia del autor*

**Válvula de corte:** es un dispositivo que se utiliza para detener o regular el flujo de un fluido en una tubería. Por lo general, se instala en una tubería y se usa para cerrar o abrir el flujo de líquidos o gases a través de ella (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 5. Válvula de corte  
Elaboración propia del autor*

**Manómetro de alta & baja:** es un instrumento utilizado en sistemas de refrigeración y aire acondicionado para medir la presión de los refrigerantes en los dos lados del sistema: el lado de alta presión y el lado de baja presión. La presión de alta es la presión en el lado del sistema que comprime el refrigerante, y la presión de baja es la presión en el lado del sistema que está enfriando el espacio o el objeto (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 6. Manómetro  
Elaboración propia del autor*

## Filtro

El filtro en un sistema de refrigeración por compresión de vapor es un componente importante que se utiliza para purificar y limpiar el refrigerante antes de que ingrese al compresor. Su función principal es atrapar partículas y contaminantes presentes en el sistema de refrigeración, evitando que lleguen al compresor y otros componentes cruciales.

El filtro se encuentra generalmente en la línea de succión, justo antes de la entrada del compresor. Puede ser un filtro secador o un filtro deshidratador, dependiendo de su diseño y función adicional. Hay varios tipos de filtros utilizados en los sistemas de refrigeración por compresión de vapor:

**Filtros de partículas:** Estos filtros están diseñados para capturar partículas sólidas, como polvo, óxido y residuos metálicos que pueden ingresar al sistema debido a la corrosión, desgaste o contaminación durante la instalación o el mantenimiento. Ayudan a proteger el compresor y otros componentes de posibles daños causados por partículas abrasivas.

**Filtros deshidratadores:** Estos filtros tienen la capacidad adicional de eliminar la humedad del sistema. Además de atrapar partículas, contienen un material deshidratante que absorbe la humedad presente en el refrigerante. La eliminación de la humedad es crucial para mantener un rendimiento óptimo del sistema de refrigeración y prevenir problemas como la formación de hielo y la corrosión (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 7. Filtro*

*Elaboración propia del autor*



## ESTADO DEL ARTE

Se toma como referencia todos los estudios realizados en la búsqueda de la disminución del consumo energético para realizar el planteamiento y solución de la propuesta partiendo de datos que, aunque se han llevado a cabo muchos estudios para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado, ninguno de ellos se ha centrado en el uso de dispositivos de transferencia de calor combinados con fuentes de energía renovable, como los tubos de calor termosifón. Por lo tanto, existe una oportunidad para investigar y desarrollar sistemas de aire acondicionado más eficientes energéticamente utilizando tecnologías de transferencia de calor y fuentes de energía renovable.

El estudio y desarrollo de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase es un tema de gran interés en la industria de la refrigeración y el aire acondicionado. En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosas investigaciones teóricas y experimentales para mejorar la eficiencia y la capacidad de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase utilizados en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Por ejemplo, se han desarrollado nuevas técnicas de fabricación y materiales para mejorar la transferencia de calor, se han optimizado los diseños de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase para mejorar el flujo de aire y líquido, y se han investigado nuevas configuraciones de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase para aplicaciones específicas. Todas estas investigaciones han llevado a mejoras significativas en la eficiencia y la capacidad de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado (San, Lin, y Pai 2009). Los tubos de cambio de fase son dispositivos que se utilizan para transferir calor de un punto a otro con un bajo gradiente térmico. Han sido ampliamente utilizados en sistemas de almacenamiento de energía, tales como sistemas de enfriamiento de computadoras, sistemas de control de temperatura de satélites y sistemas de enfriamiento en la industria aeroespacial. Los tubos de cambio de fase son muy adecuados para la función de suministro de calor debido a su alta eficiencia, confiabilidad y bajo mantenimiento. Además, su diseño compacto y ligero los

hace ideales para aplicaciones donde se requiere un alto rendimiento térmico en un espacio reducido (San, Lin, y Pai 2009).

Li et al. (2017), evaluaron un intercambiador de calor de materiales de cambio de fase para aplicaciones de aire acondicionado en automóviles. Encontraron que la eficiencia del sistema mejoró significativamente al utilizar este tipo de intercambiador de calor, disminuyendo el consumo de energía en un 24% en comparación con los sistemas convencionales (Li et al. 2017).

Shyu (1996), en un estudio diseñó un precalentador de aire termosifón, que es un tipo de intercambiador de calor en el que el calor se transfiere naturalmente por convección, para evaluar su eficiencia en la recuperación de calor residual. El objetivo del estudio era predecir la transferencia de calor en este dispositivo y evaluar su aplicabilidad para la recuperación de calor residual en aplicaciones industriales. El estudio utilizó modelos matemáticos y experimentos para evaluar la transferencia de calor en el precalentador de aire termosifón y los resultados indicaron que este dispositivo era eficiente para la recuperación de calor residual en aplicaciones industriales, descubrieron que a medida que aumentaba la temperatura del gas caliente, también aumentaba la tasa de transferencia de calor (Shyu 1996).

En el estudio realizado por Naphon (2010), se investigó la aplicación de tubos de cambio de fase en la mejora del rendimiento del sistema de aire acondicionado. Se utilizó un sistema de aire acondicionado convencional y se instaló un intercambiador de calor de tubo de calor en la entrada del condensador para enfriar el aire entrante. Se realizaron mediciones experimentales para comparar el rendimiento del sistema de aire acondicionado con y sin el intercambiador de calor de tubo de calor. Los resultados mostraron que la instalación del intercambiador de calor de tubo de calor en la entrada del condensador mejoró significativamente el rendimiento del sistema de aire acondicionado. Además, se encontró que la temperatura del aire de salida se redujo en un 18% y el  $COP_R$  del sistema aumentó en un 16%. El resultado de mostró que el tubo de calor es un dispositivo muy útil para reducir el consumo de energía en los sistemas de aire acondicionado tipo Split (Naphon 2010).

Naphon, Assadamongkol, y Borirak (2008), describen una investigación experimental sobre la eficiencia térmica de los tubos de calor utilizando nano fluidos de titanio. Los

investigadores probaron diferentes concentraciones de nano fluidos y evaluaron la transferencia de calor y la eficiencia térmica de los tubos de calor. Los resultados mostraron que los nano fluidos de titanio mejoraron significativamente la eficiencia térmica de los tubos de calor, lo que sugiere que pueden ser una opción prometedora para mejorar la transferencia de calor en aplicaciones de tubos de calor (Naphon, Assadamongkol, y Borirak 2008).

El estudio de Srimuang, Rittidech, y Bubphachot (2009), se centró en investigar las características de transferencia de calor de un termosifón plano vertical, utilizando agua como fluido de trabajo. Los investigadores realizaron mediciones experimentales de la temperatura y la tasa de transferencia de calor en diferentes condiciones de operación, como variaciones en la carga térmica y la posición de la línea de llenado. Luego, analizaron los resultados para determinar la influencia de estos factores en la eficiencia del termosifón. Los hallazgos de este estudio pueden ayudar a mejorar el diseño y la eficiencia de los dispositivos de transferencia de calor que utilizan termosifones planos verticales. También examinaron la influencia de la posición del evaporador y el ángulo de inclinación en el rendimiento del termosifón plano. Encontraron que el mejor rendimiento se logró cuando el evaporador estaba en la parte inferior y el ángulo de inclinación era de aproximadamente 30°C. Además, descubrieron que la eficiencia térmica del termosifón plano mejoró con la adición de aletas al evaporador (Srimuang, Rittidech, y Bubphachot 2009).

El estudio realizado por Yau y Ahmadzadehtalatapeh (2011), investigó el uso de un intercambiador de calor aire-aire en sistemas de aire acondicionado en climas tropicales para mejorar la eficiencia energética y la deshumidificación del aire. El intercambiador de calor aire-aire fue utilizado para recuperar la energía del aire de escape y pre-enfriar el aire de entrada antes de que entrara en el sistema de aire acondicionado. Los resultados del estudio mostraron una mejora en la eficiencia energética del sistema de aire acondicionado y una disminución en el consumo de energía eléctrica. Además, se observó una mejora en la deshumidificación del aire que ingresaba al sistema de aire acondicionado, lo que resultó en un mayor confort para los ocupantes de los edificios en climas tropicales. se centró en la evaluación del efecto de un intercambiador de calor aire-aire en la recuperación de energía y la mejora de la deshumidificación en un sistema

de aire acondicionado en un clima tropical. Se realizaron experimentos en un laboratorio climático para medir la temperatura y la humedad relativa del aire acondicionado en las condiciones de carga parcial y completa con y sin el intercambiador de calor. Los resultados mostraron que el intercambiador de calor mejoró significativamente la eficiencia energética del sistema y redujo la carga en el compresor del aire acondicionado. Además, la deshumidificación se mejoró mediante la reducción del contenido de humedad en el aire de retorno y la reducción del consumo de energía del deshumidificador del aire acondicionado (Yau y Ahmadzadehtalatapeh 2011).

Este artículo describe un estudio en el que se investigó el potencial de un intercambiador de calor de tubos de calor para mejorar la eficiencia energética y la deshumidificación de los sistemas de aire acondicionado en climas tropicales. Los autores utilizaron datos meteorológicos típicos de un año para predecir el rendimiento anual del intercambiador de calor en términos de recuperación de energía y mejora de la deshumidificación. Los resultados mostraron que el intercambiador de calor de tubos de calor podría mejorar significativamente la eficiencia energética y la capacidad de deshumidificación del sistema de aire acondicionado en climas tropicales (Yau y Ahmadzadehtalatapeh 2011).

Xuan, Hong, y Li (2004), llevaron a cabo un estudio experimental para investigar el comportamiento transitorio de los tubos de calor de placa plana en diferentes condiciones de operación. Se midió la transferencia de calor y la temperatura en diferentes puntos del tubo de calor durante el proceso de arranque y parada. Se encontró que la temperatura de la evaporación aumentaba rápidamente después del encendido, mientras que la temperatura de la condensación disminuía rápidamente después del apagado. También se encontró que el tiempo de respuesta del tubo de calor de placa plana era más rápido que el de los tubos de calor cilíndricos, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones que requieren una rápida respuesta de enfriamiento o calentamiento. se investigó el comportamiento transitorio de los tubos de calor de placa plana. Los autores utilizaron un modelo matemático para simular el comportamiento transitorio de los tubos de calor de placa plana en condiciones de carga térmica variable. Se encontró que el tiempo de respuesta de los tubos de calor de placa plana es más corto que el de los tubos de calor convencionales, lo que indica que son más adecuados para aplicaciones que requieren una rápida respuesta térmica, como la refrigeración de

dispositivos electrónicos. Además, se estudió el efecto de la geometría y la configuración del tubo de calor en el comportamiento transitorio, lo que permitió a los autores proponer recomendaciones para el diseño de tubos de calor de placa plana optimizados (Xuan, Hong, y Li 2004).

El estudio de Ong y Haider-E-Alahi (2003), se enfocó en investigar el rendimiento térmico de un termosifón lleno de R-134a, un refrigerante comúnmente utilizado en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Los autores realizaron experimentos para medir las temperaturas de la superficie y la presión en diferentes ubicaciones del termosifón y utilizaron los datos obtenidos para analizar el rendimiento térmico del dispositivo. Los resultados mostraron que la cantidad de refrigerante y la ubicación del evaporador y el condensador en el termosifón afectan significativamente el rendimiento térmico del dispositivo. Además, los autores observaron que el termosifón alcanzó su máxima capacidad de transferencia de calor cuando la carga térmica se mantuvo dentro de ciertos límites. Se centró en investigar el rendimiento térmico de un termosifón lleno de R-134a, un refrigerante comúnmente utilizado en sistemas de refrigeración y aire acondicionado. El rendimiento térmico se evaluó en términos de la capacidad de transferencia de calor y la eficiencia térmica del termosifón en función de la carga de refrigerante y la posición del evaporador y del condensador. Los resultados mostraron que la capacidad de transferencia de calor y la eficiencia térmica aumentaron con la carga de refrigerante y que la posición del evaporador y del condensador también tuvo un efecto significativo en el rendimiento térmico del termosifón (Ong y Haider-E-Alahi 2003).

En otro estudio de Ong y Haider-E-Alahi (2003), describe el desarrollo de una tecnología de tubo de calor de termosifón de aireación que se utilizó para controlar la temperatura del arroz en un silo a granel. Este sistema permite la circulación natural del aire a través del tubo de calor para ayudar a controlar la temperatura del arroz en el silo, lo que a su vez ayuda a prevenir la pérdida de calidad del arroz debido a un almacenamiento incorrecto. El estudio incluyó pruebas experimentales en las que se midieron la temperatura y la humedad del aire dentro del silo, y se utilizó un modelo matemático para predecir la temperatura del lecho del arroz en el silo. se enfoca en el desarrollo y aplicación de una tecnología de tubo de calor de termosifón de aireación para controlar

la temperatura del arroz almacenado en un silo a granel. El objetivo principal es prevenir la acumulación de calor y mantener la calidad del arroz durante su almacenamiento. El estudio propone un modelo matemático para predecir la temperatura del lecho de arroz en el silo utilizando la tecnología de tubo de calor de termosifón de aireación. Se realizaron pruebas experimentales y se compararon los resultados con las predicciones del modelo. Los resultados mostraron que la tecnología de tubo de calor de termosifón de aireación es efectiva para controlar la temperatura del arroz en el silo y que el modelo propuesto puede predecir con precisión la temperatura del lecho de arroz en el silo (Ong y Haider-E-Alahi 2003).

El estudio de Hsiao (2009), se centró en mejorar el rendimiento térmico de un sistema de aire acondicionado utilizando una unidad de almacenamiento en frío como subenfriado. La unidad de almacenamiento en frío utiliza agua fría para enfriar el refrigerante subenfriado antes de que entre en el evaporador del sistema de aire acondicionado, lo que permite una mayor transferencia de calor y una mayor eficiencia energética. En el estudio, se realizaron pruebas experimentales en un sistema de aire acondicionado equipado con la unidad de almacenamiento en frío y se evaluaron su capacidad de enfriamiento, el  $COP_R$  y la eficiencia energética. Los resultados mostraron que la utilización de la unidad de almacenamiento en frío mejoró significativamente el rendimiento del sistema de aire acondicionado, aumentando la capacidad de enfriamiento y mejorando el  $COP_R$  y la eficiencia energética. se investigó la mejora del rendimiento térmico de un sistema de aire acondicionado que utilizaba una unidad de condensación (CSU) como subenfriado. Se encontró que el uso de la CSU en el sistema de aire acondicionado mejoró el rendimiento en un 9% en comparación con el sistema sin CSU. También se observó que la eficiencia del compresor se incrementó en un 5%, mientras que la carga térmica en el evaporador disminuyó en un 10%. Además, se encontró que la operación del sistema con la CSU era más estable y con una menor fluctuación en la temperatura de salida (Hsiao et al. 2009).

Qiao (2020), evaluó un sistema de aire acondicionado con intercambiadores de calor de PCM para R1234ze como refrigerante. Se encontró que este sistema mejoró significativamente la eficiencia energética en comparación con los sistemas convencionales, disminuyendo el consumo de energía en un 29%.(Qiao et al. 2020)

Bajo la información recopilada se construyeron intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, el cual es un dispositivo que utiliza la transferencia de calor por cambio de fase, es decir, la evaporación y condensación de un fluido, para transferir calor entre dos fluidos. Estos intercambiadores constan de varios tubos en los que circula agua a la cual se le realizó proceso de vacío para que su punto de ebullición se encuentre por debajo de la temperatura del refrigerante que circula por las tuberías. El agua se evapora en la parte caliente del tubo y se condensa en la parte fría, transfiriendo calor al fluido que circula por la carcasa. Los intercambiadores de calor por tubos de fase se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la refrigeración y el aire acondicionado, la generación de energía y la industria química (Kalani, masa, 2015).

Si la temperatura de ebullición no se mide a la presión atmosférica normal, la dependencia de la presión de vapor respecto a la temperatura puede calcularse cuantitativamente por la ecuación de Clausius-Clapeyron: (Hayashi et al. 2011)

Si se reduce la presión, el punto de ebullición del agua también se reduce, lo que puede mejorar la transferencia de calor en el intercambiador. Esto se debe a que el agua en el tubo de alta temperatura cambia de fase a vapor a una temperatura más baja, lo que permite que el refrigerante absorba más calor.

Estos estudios proporcionan evidencia sólida de que los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase pueden mejorar significativamente la eficiencia energética un sistema de refrigeración por compresión de vapor en comparación con los intercambiadores de calor convencionales. Cada estudio se enfocó en diferentes aspectos del intercambiador de tubos de fase, pero en general todos los estudios encontraron mejoras significativas en la eficiencia energética del sistema.

En la imagen 9 se puede evidenciar el cuerpo interno de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase y la tubería de cobre generando todo el intercambio de calor al estar en contacto dentro de un número de vueltas que se determinan abajo el diseño de fabricante. Por lo tanto el propósito de esta investigación fue poder implementar intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase para realizar las mediciones térmicas de la temperatura del refrigerante al ingreso del condensador, generando algunas modificaciones al sistema de refrigeración compresión de vapor, construyendo una vía secundaria entre el compresor y el condensador la cual se muestra en la imagen 8,

donde una de las vías tiene paso directo entre el compresor y el condensador, y la otra debe cruzar los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, esto es posible gracias a un juego de válvulas y de esta forma puede medir el cambio de la temperatura y poder determinar un resultado negativo o positivo que determine la viabilidad del sistema.

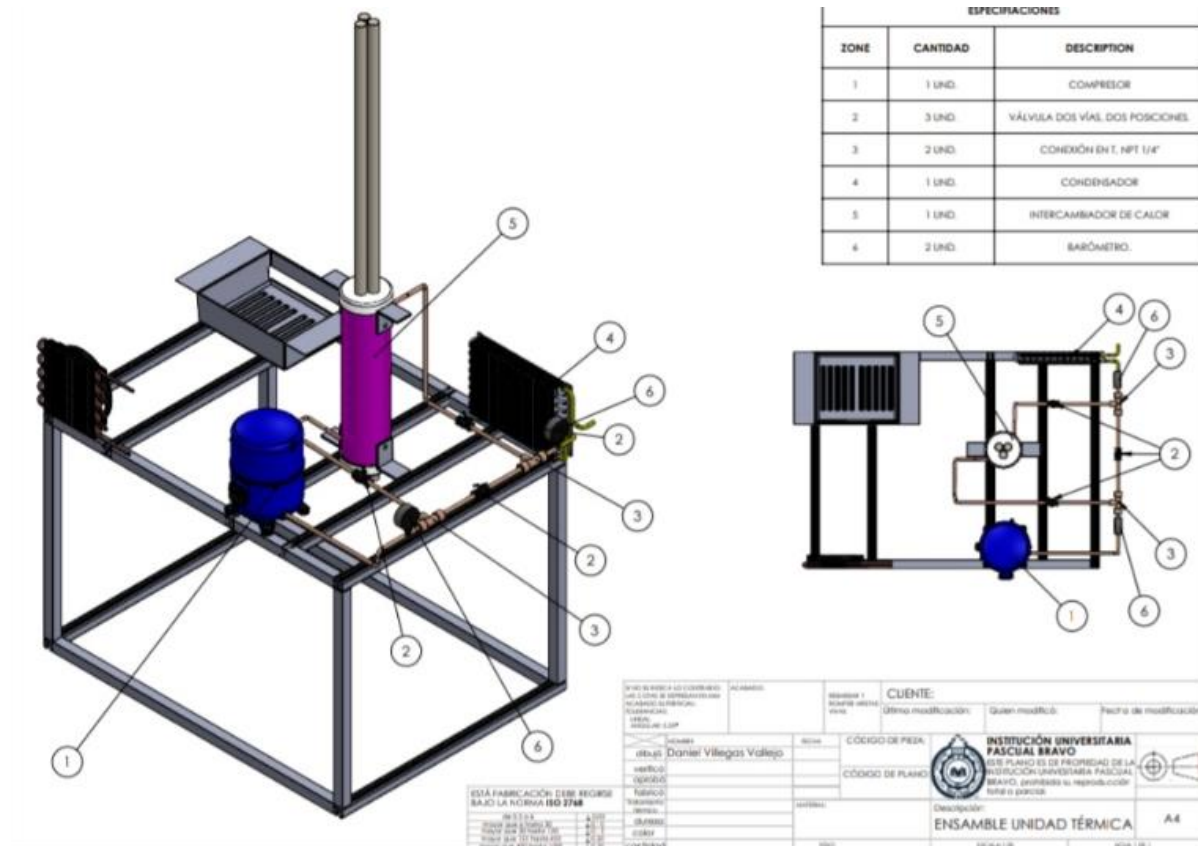


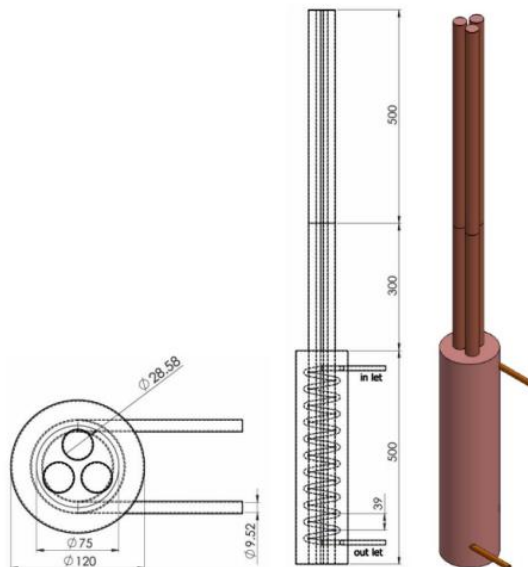
Ilustración 8. Banco con intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, Elaboración propia del autor





*Ilustración 9. intercambiador de calor.  
Elaboración propia del autor*

Intercambiador de calor por tubos de cambio fase propuesto en la investigación realizada por (Juengjaroennirachon et al. 2017).



*Ilustración 10. Intercambiador de calor.  
(Juengjaroennirachon et al. 2017)*

## METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico se utilizó el diseño propuesto por Juengjaroennirachon (2017), este diseño tiene una capacidad de 2.75 kW (9400 BTU/hr) y utiliza agua como refrigerante en lugar del R-22 (Juengjaroennirachon et al. 2017).

Se procede hacer toda la toma de medidas con el acompañamiento de asesor de trabajo de grado para el desarrollo de los planos al banco en el cual se encuentra ubicado el sistema de refrigeración por compresión de vapor, la construcción del solido en el programa de diseño SolidWorks y la cotización de materiales para el mantenimiento del sistema de refrigeración.



*Ilustración 11. Banco de refrigeración.  
Elaboración propia del autor*

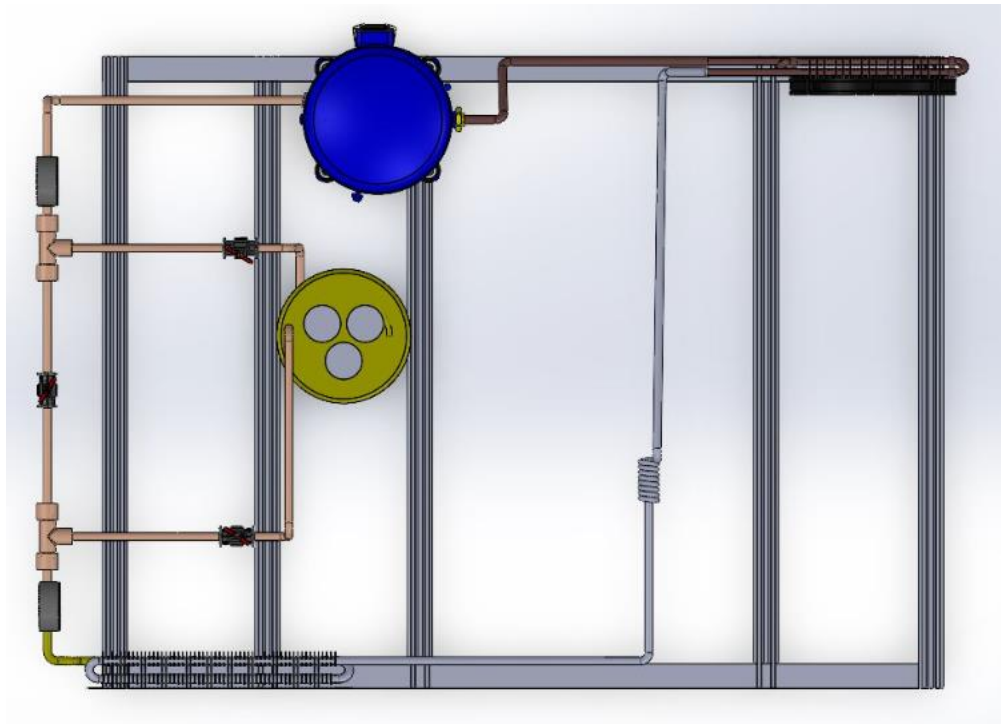


Ilustración 12. Sólido, banco de refrigeración.  
Elaboración propia del autor

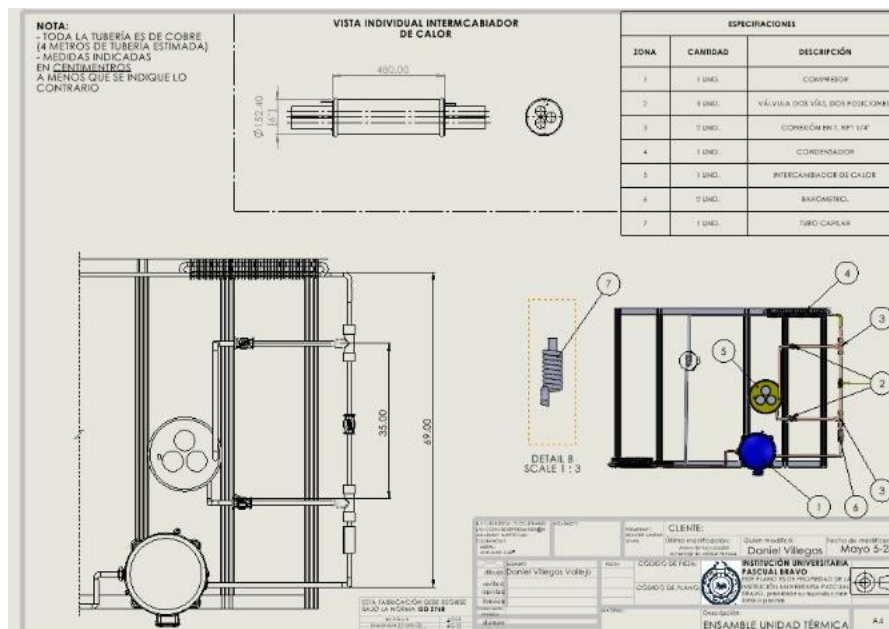
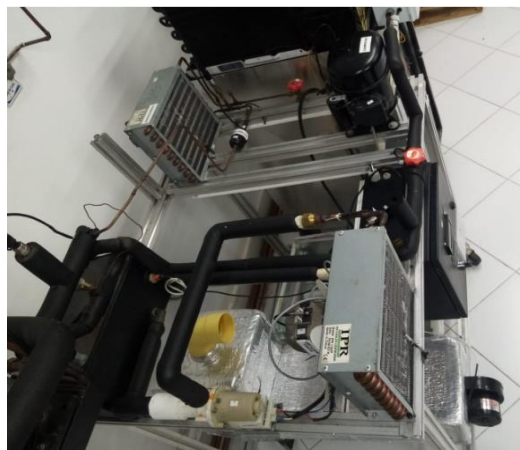


Ilustración 13. Planos de diseño.  
Elaboración propia del autor

Antes de la construcción de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase se realizó la puesta a punto del sistema de refrigeración por compresión de vapor en el que sería instalado, el cual se encuentra en el laboratorio de refrigeración y atmosferas controladas de la Institución Universitaria Pascual Bravo ya que se encontraba en mal estado en su parte funcional y el evaporador estaba trabajando con agua y se remplazó la válvula de expansión por un capilar.

Según el modelo y el montaje para poder garantizar todo el ciclo de refrigeración se modificó el sistema de refrigeración por compresión de vapor en el cual se encuentra instalado el intercambiador de calor por tubos de fase ya que el evaporador se encontraba funcionando por medio de una válvula de expansión y agua, sin embargo al realizar la modificación retirando dichos componentes; se remplaza la válvula de expansión por un capilar para un compresor de  $1/2$  HP, se realiza el vacío para retirar toda la humedad de sistema y evitar una gota de agua en la parte interna de la tubería ya que puede llegar al capilar y congelarse generando que se obstruya el sistema de refrigeración; el evaporador se deja trabajando por medio de un serpentín refrigerado por un ventilador.



*Ilustración 14. Banco de refrigeración.  
Elaboración propia del autor*

Los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase es un equipo consiste inicialmente en un tubo de calor tipo termosifón con un tubo de cobre enrollado dentro del tanque de almacenamiento de energía cilíndrico, dicho tanque se elaboró por medio

de un tubo de PVC, el tanque tendrá un diámetro de 6" y una longitud de 480 mm el cual albergará en su interior un tubo de cobre enrollado con un diámetro de  $\frac{1}{4}$  ", de tubería de cobre flexible entre los tubos de fase con una longitud de 460 mm con los cuales se pretende una disminución de energía térmica del refrigerante por contacto.



*Ilustración 15. Banco de refrigeración con intercambiador.  
Elaboración propia del autor*

Se realizó la instalación del intercambiador de calor por tubos de cambio fase al sistema de refrigeración por compresión de vapor, donde se procede a la toma de temperatura con un termómetro digital de pinza a la salida del compresor, a la entrada y salida del condensador, a la entrada y salida del intercambiador tubos de fase, a la salida del capilar, y a la entrada del compresor, dando toda la vuelta al ciclo de refrigeración.

El voltaje y la corriente que se suministraron a los componentes del sistema se midieron utilizando una pinza amperimétrica digital ya que el compresor trabaja a 220v y el evaporador a 110v.

**Pinza amperimétrica:** también conocida como alicate amperimétrico, es una herramienta de medición utilizada para medir la corriente eléctrica en un circuito sin necesidad de interrumpir el flujo de corriente (Juan Manuel Franco Lijó 2006).



*Ilustración 16. Pinza amperimétrica  
Elaboración propia del autor*

**Termómetro de pinza:** es un dispositivo de medición de temperatura que se utiliza para medir la temperatura de objetos pequeños o superficies planas. Este tipo de termómetro tiene una pinza en la punta que se utiliza para sujetar el objeto o superficie a medir, y una pantalla LCD para mostrar la temperatura. El sensor de temperatura se encuentra en la punta de la pinza y puede medir temperaturas desde  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta  $300^{\circ}\text{C}$  o más, dependiendo del modelo (Juan Manuel Franco Lijó 2006)



*Ilustración 17, Termómetro de pinza.  
Elaboración propia del autor*



*Ilustración 18. Lectura de temperatura.  
Elaboración propia del autor*

Para evaluar la eficiencia de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase en un sistema de refrigeración por compresión de vapor se tomó toda la formulación del libro de Termodinámica (Çengel y Boles 2012), 7 edición capítulo 11 ciclos de refrigeración del cual se tomaron los cálculos para  $Ql$ ,  $W$ ,  $COP_R$ .

El término " $Ql$ " se refiere a la carga de refrigeración o carga térmica de un sistema de refrigeración. Representa la cantidad de calor que debe ser extraído o transferido para mantener una determinada temperatura o condiciones de refrigeración en un espacio o proceso, donde  $m$  es la masa del sistema,  $h_1$  y  $h_4$  son las entalpías en los estados inicial y final del proceso.

$$Ql = m(h_1 - h_4)$$

*Ecuación 1. Carga térmica*

El término " $W$ " se refiere a la potencia de refrigeración o capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración. Representa la cantidad de energía transferida o absorbida por el sistema en un determinado intervalo de tiempo, donde  $m$  es la masa del sistema o la cantidad de sustancia involucrada en el proceso,  $h_2 - h_1$  son las entalpías del sistema en los estados final e inicial del proceso.

$$W = m(h_2 - h_1)$$

*Ecuación 2. Trabajo realizado*



El  $COP_R$  es una medida adimensional y generalmente se expresa como un número positivo. Cuanto mayor sea el valor del  $COP_R$ , más eficiente será el sistema de refrigeración, ya que producirá más enfriamiento con menos consumo de energía eléctrica.

Es importante tener en cuenta que el  $COP_R$  puede variar según las condiciones de funcionamiento del sistema, como la temperatura ambiente, la temperatura de entrada y salida del refrigerante, y la carga de refrigeración específica. Además, el  $COP_R$  puede ser influenciado por el tipo de sistema de refrigeración utilizado, como sistemas de compresión de vapor, sistemas de absorción, sistemas de ciclo de refrigeración por compresión, entre otros.

$$COP_R = \frac{Q_l}{W}$$

*Ecuación 3. Coeficiente de rendimiento*

El término ( $\dot{m}_r$ ) hace referencia al flujo masico de compresor, se refiere a la cantidad de masa de refrigerante que fluye a través del sistema de refrigeración por unidad de tiempo. Representa la tasa a la cual el refrigerante es transferido o circula a través de los diferentes componentes del sistema, como el compresor, el evaporador y el condensador. El cual se obtiene con la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{V}}{v_g} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

*Ecuación 4. flujo masico de compresor*

En el presente informe, se trabajó con la referencia CAE4456Y de compresor. Para calcular el flujo volumétrico ( $\dot{V}$ ), el cual se expresa en metros cúbicos por segundo ( $\frac{m^3}{s}$ ), se utilizó la ecuación obtenida a partir de los datos proporcionados en la ficha técnica del compresor (Tecumseh Europe).

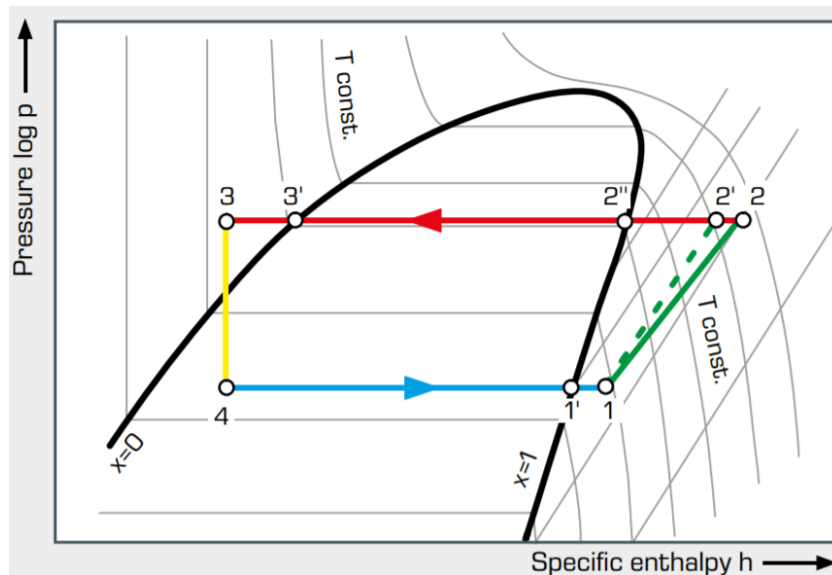


$$\dot{V} = \frac{c \cdot c * N * rpm}{100^3 * 60} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

*Ecuación 5. Flujo Volumétrico*

El término  $v_g$  es el volumen específico del refrigerante en estado de vapor a la succión del compresor; Permite determinar el caudal de refrigerante que fluye a través del sistema, así como calcular parámetros de rendimiento, como la capacidad de enfriamiento y la eficiencia del compresor, y se obtuvo de la tabla A – 11 refrigerante R134 (Çengel y Boles 2012).

En el cual se tomaron las temperaturas en  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  y el flujo masico del refrigerante calculados en un ciclo de refrigeración ideal.



*Ilustración 19. Ciclo de refrigeración.  
Tomado de hvac-eng*

EL término " $h_1$ " se refiere a la entalpía en el punto de entrada del refrigerante al compresor, la cual se encuentra en la gráfica en el punto 1.

El término " $h_2$ " se refiere a la entalpía de salida del refrigerante del compresor y antes de entrar al condensador, la cual se encuentra en la gráfica en el punto 2.

El término " $h_3$ " se refiere a la entalpía en la salida del refrigerante del condensador y antes de entrar al dispositivo de expansión (por ejemplo, una válvula de expansión), refrigerante la cual se encuentra en la gráfica en el punto 3.

## RESULTADOS

Dando cumplimiento a los objetivos establecidos se realizó la toma de temperaturas, en la salida del compresor en la entrada y salida del condensador, del intercambiador de calor por tubos de cambio fase y en la entrada del compresor dando toda la vuelta al ciclo de refrigeración donde se obtuvieron los siguientes resultados:

	Sin intercambiador de calor	Con intercambiador de calor
Salida de compresor	106°C	100°C
Entrada de condensador	102,7°C	76,2°C
Salida del condensador	44,4°C	36°C
Entrada del evaporador	-5.5°C	-7.2°C
Salida del evaporador	30°C	28°C
Entrada del intercambiador	No Aplica	95°C
Salida del intercambiador	No Aplica	83,2°C
Tubo de fase #1	No Aplica	38°C
Tubo de fase #2	No Aplica	36°C
Tubo de fase #3	No Aplica	35°C
Amperaje	3,21A	3,63A

*Tabla 1. Medición banco de refrigeración*

*Medición banco de refrigeración*

*Presión de alta = 250 psi*

*Presión de baja = 11 psi*

Los Psi se pasan a kPa.

11 psi = 75.8423 kPa

250 psi = 1723.69 kPa

Luego a los kPa le sumamos la presión atmosférica de la ciudad donde se está realizando las pruebas (Medellín 85.3 atm)

(h<sub>1</sub>) 75.8423 + 85.3 = 161.1423 kPa

(h<sub>2</sub>) 1723.69 + 85.3 = 1.808.99 kPa

(h<sub>3</sub>) 1723.69 + 85.3 = 1.808.99 kPa

**Evaluación del flujo volumétrico:**

$$\dot{V} = \frac{c.c * N * rpm}{100^3 * 60} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

*Ecuación 5. Flujo Volumétrico*

Donde;

*c.c* Es el desplazamiento de refrigerante en centímetros cúbicos (el valor suministrado en el catálogo es en in<sup>3</sup> por cada revolución)

*N* Es el número de pistones del compresor

*rpm* Es la velocidad de giro del compresor en revoluciones por minuto (asumir velocidad de giro como 3600 rpm)

$$\dot{V} = \frac{0,99*1*3600}{100^3*60} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 0.0000594 \frac{m^3}{kg}$$

**Evaluación del flujo masico:**

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{V}}{v_g} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

*Ecuación 4. flujo masico de compresor*

Donde:

*v<sub>g</sub>*: Es el volumen específico del refrigerante en estado de vapor a la succión del compresor

$\dot{V}$ : Es el flujo volumétrico en  $\frac{m^3}{s}$  y se puede calcular de acuerdo con la ecuación de flujo volumétrico

### Ciclo sin intercambiador de calor

$$v_g = 0,1560 \frac{m^3}{kg}$$

$$\dot{m}_r = \frac{0,0000594 \frac{m^3}{kg}}{0,1560 \frac{m^3}{kg}} \left[ \frac{kg}{s} \right] = 0,000381 \frac{kg}{s}$$

*Ecuación 4. flujo masico de compresor*

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = 11psi \\ T_1 = 30^\circ C \end{array} \right\} h_1 = 279,6kj/kg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_2 = 250psi \\ T_2 = 106^\circ C \end{array} \right\} h_2 = 331,9kj/kg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_3 = 250psi \\ T_3 = 44,4^\circ C \end{array} \right\} h_3 = 114,7kj/kg$$

$$h_4 \cong h_3 = \text{Estrangulamiento } h_4 = 114,7kj/kg$$

$$\dot{m}_r = (0,000381kg/s) \text{ flujo masico del refrigerante}$$

$$Ql = m(h_1 - h_4)$$

*Ecuación 1. Carga térmica*

$$Ql = (0,000381kg/s)[(279,6 - 114,7)Kj/Kg] = 0,062Kw$$

$$W = m(h_2 - h_1)$$

*Ecuación 2. Trabajo realizado*

$$W = (0,000381kg/s)[(331,9 - 279,6)Kj/Kg] = 0,019Kw$$

$$COP_R = \frac{Ql}{W}$$

*Ecuación 3. Coeficiente de rendimiento*

$$COP_R = \frac{0,062w}{0,019kw} = 3,263$$

### Ciclo con intercambiador de calor

$$v_g = 0,1548 \frac{m^3}{kg}$$

$$\dot{m}_r = \frac{0,0000594 \frac{m^3}{kg} \left[ \frac{kg}{s} \right]}{0,1548 \frac{m^3}{kg}} = 0,000383 \frac{kg}{s}$$

*Ecuación 4. flujo masico de compresor*

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = 11psi \\ T_1 = 28^\circ C \end{array} \right\} h_1 = 277,9kj/kg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_2 = 250psi \\ T_2 = 100^\circ C \end{array} \right\} h_2 = 335,0kj/kg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_3 = 250psi \\ T_3 = 36^\circ C \end{array} \right\} h_3 = 102,2kj/kg$$

$$h \cong 4 = \text{Estrangulamiento } h_4 = 102,2kj/kg$$

$$m = (0,000383kg/s) \text{ flujo masico del refrigerante}$$

$$Ql = m(h_1 - h_4)$$

*Ecuación 1. Carga térmica*

$$Ql = (0,000383kg/s)[(277,9 - 102,2)Kj/Kg] = 0,067Kw$$

$$W = m(h_2 - h_1)$$

*Ecuación 2. Trabajo realizado*

$$W = (0,000383kg/s)[(335,0 - 277,9)Kj/Kg] = 0,021Kw$$

$$COP_R = \frac{Ql}{W}$$

*Ecuación 3. Coeficiente de rendimiento*

$$COP_R = \frac{0,067Kw}{0,021kw} = 3,190$$

A continuación, se demuestran los resultados en un diagrama de Mollier aplicado en un ciclo de refrigeración ideal:

El diagrama de color rojo representará el ciclo de refrigeración sin la aplicación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, y el diagrama de color amarillo representa el ciclo de refrigeración con la aplicación de intercambiadores.

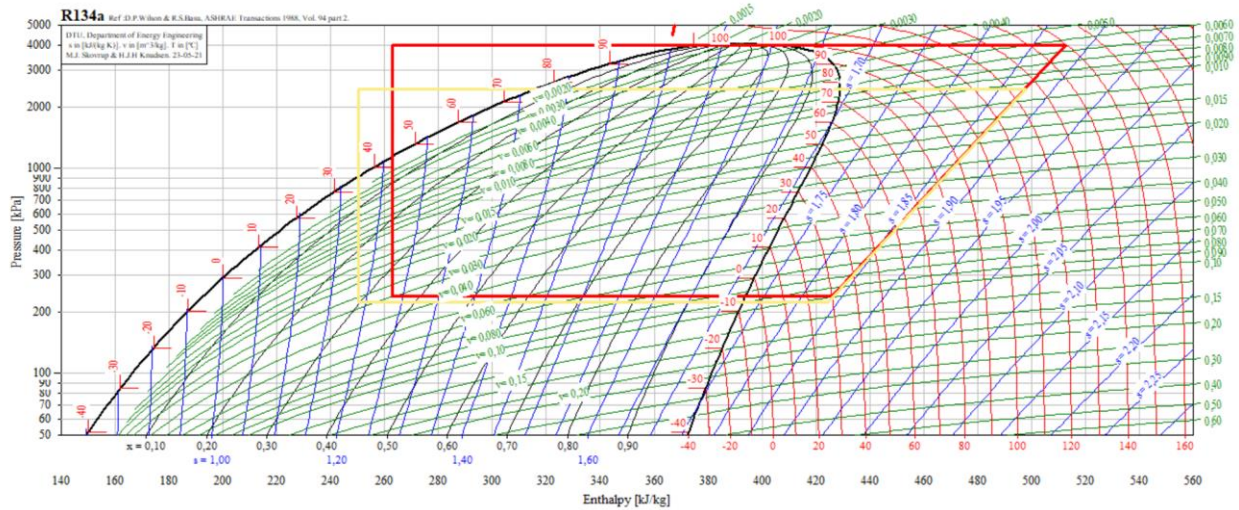


Ilustración 20. Diagrama de Mollier.  
Elaboración propia del autor.

## ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente análisis, se examinarán los resultados obtenidos en relación con los objetivos establecidos para la evaluación del impacto de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase sobre el rendimiento energético aplicado en un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Se llevo a cabo una evaluación detallada de los datos recopilados y se analizó su relevancia en relación con los criterios previamente definidos. El objetivo principal de este análisis es proporcionar una visión clara y objetiva sobre el grado de cumplimiento de los objetivos planteados y brindar recomendaciones para futuras acciones.

Se construyo intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase y se adaptó en un sistema de refrigeración por compresión de vapor que pertenece la institución universitaria pascual bravo el cual se encuentra ubicado en el laboratorio de refrigeración y atmosferas controladas.

En la tabla 1 se encuentran los resultados de temperaturas las cuales se tomaron antes y después de la instalación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase en un sistema de refrigeración por compresión de vapor, realizando las tomas a la salida de compresor, entrada del condensador, salida del condensador, salida del capilar y entrada del compresor en el que se encontró una disminución de la tempera del refrigerante.

Al evaluar el rendimiento energético del sistema de sistema de refrigeración por compresión de vapor con la adaptación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase evaluando el  $(Q_l, W, COP_R)$  se obtuvieron los siguientes resultados: La interpretación de que la carga térmica del sistema de refrigeración aumentó de 0.062 kW a 0.067 kW después de instalar intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase implica un ligero incremento en la capacidad de enfriamiento del sistema.

El aumento en la carga térmica indica que el sistema es capaz de absorber y disipar una mayor cantidad de calor del medio a enfriar. Esto puede ser atribuido a la instalación de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase, los cuales mejoran la transferencia de calor entre el refrigerante y el medio a enfriar.



Este resultado puede ser interpretado positivamente, ya que implica que el sistema de refrigeración ha mejorado su capacidad para satisfacer una demanda mayor de enfriamiento. El aumento de 0.005 kW en la carga térmica puede ser considerado como una mejora en la eficiencia del sistema y su capacidad para extraer calor del medio.

En resumen, el aumento de la carga térmica de 0.062 kW a 0.067 kW después de instalar intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase indica una mejora en la capacidad de enfriamiento del sistema de refrigeración. Esto implica una mayor eficiencia en la absorción y disipación del calor del medio a enfriar.

Al evaluar la potencia del sistema de refrigeración presenta aumentó de 0.019 kW a 0.021 kW después de instalar intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase implica un ligero aumento en el consumo de energía del sistema.

El aumento en la potencia indica que se requiere una mayor cantidad de energía para el funcionamiento del sistema después de la instalación de los intercambiadores de calor. Esto puede deberse al incremento en el trabajo del compresor y a la necesidad de superar la resistencia adicional generada por los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase.

Es importante considerar que, aunque la potencia aumentó, esto no necesariamente implica una mejora en la eficiencia energética del sistema. En algunos casos, el incremento en la potencia puede ser necesario para lograr una mayor capacidad de enfriamiento o una transferencia de calor más eficiente.

La interpretación ( $COP_R$ ) del sistema de refrigeración por compresión de vapor disminuyó de 3.262 a 3.190 después de instalar intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase implica una ligera reducción en la eficiencia del sistema.

El ( $COP_R$ ) es una medida de la eficiencia de un sistema de refrigeración y se define como la relación entre la capacidad de enfriamiento ( $Q_c$ ) y la potencia de entrada ( $P_{in}$ ) requerida para lograr esa capacidad de enfriamiento. Un valor más alto de COP indica una mayor eficiencia energética del sistema.

En este caso, la disminución de 3.262 a 3.190 en el COP significa que el sistema está produciendo una capacidad de enfriamiento ligeramente menor en relación con la potencia de entrada requerida. Esto indica una ligera disminución en la eficiencia

energética del sistema después de la instalación de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase.

Existen varias posibles explicaciones para esta disminución en el ( $COP_R$ ). La instalación de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase puede generar una mayor resistencia al flujo de refrigerante, lo que puede resultar en una mayor carga térmica o en una disminución en la transferencia de calor efectiva. Esto podría conducir a una mayor potencia de entrada requerida para lograr la misma capacidad de enfriamiento.

En la entrada del condensador, se realizaron mediciones de temperatura del refrigerante R-134a antes y después de instalar intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase. Sin los intercambiadores, se obtuvo una lectura de temperatura de 102.7°C, mientras que, con la instalación de los intercambiadores, la temperatura disminuyó a 76.2°C, resultados demostrados en la ilustración 19 grafica diagrama de Mollier. Estos resultados difieren de un estudio previo realizado por Juengjaroennirachon 2017, quienes lograron una reducción de temperatura del refrigerante en la entrada del condensador de 11.67°C utilizando R-134a.

A pesar de esta diferencia, el  $COP_R$  del sistema estudiado mostró un aumento significativo del 22.75%, en comparación con el estudio anterior donde el  $COP_R$  tuvo una disminución de 2,24%. Además, en el estudio previo se logró un aumento de la capacidad de enfriamiento del sistema en un 19.62%, mientras que en el estudio anterior solo se obtuvo un aumento del 8,06%. También, en el estudio previo se logró una reducción del consumo de energía de hasta un 3.76%, mientras que en nuestro estudio aumento del 10,53%. (Juengjaroennirachon et al. 2017).

En conclusión, se encontró que la aplicación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase en un sistema de refrigeración por compresión de vapor puede mejorar la carga de refrigeración o carga térmica del sistema. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esto puede resultar en un mayor consumo energético en comparación con la potencia de refrigeración o capacidad de enfriamiento del sistema.

En el presente estudio, se demostró que las condiciones de trabajo de los intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase pueden generar un  $COP_R$  estable en un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Esto implica que, a pesar del

mayor consumo energético, se logra mantener una eficiencia en el rendimiento del sistema.

En resumen, la aplicación de intercambiadores de calor por tubos de cambio de fase puede ser beneficiosa para mejorar la carga térmica de un sistema de refrigeración, pero se debe tener en cuenta el balance entre la carga de refrigeración y el consumo energético para obtener un rendimiento óptimo del sistema. Se recomienda para próximos estudios mejorar el sistema de compresión a vapor con una calibración del equipo y sustituir el capilar por una válvula de expansión ya que este puede mejorar el flujo del refrigerante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Çengel, Yunes A, y Michael A Boles. 2012. *Termodinámica*.
- Chaudhry, Hassam Nasarullah, Ben Richard Hughes, y Saud Abdul Ghani. 2012. “A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(4): 2249–59.
- Darmstadter, Joel. 2004. “Energy and Population”.
- Energy Agency, International. 2020. “World Energy Outlook 2020”. [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo) (el 30 de abril de 2023).
- Faraj, Khaireldin et al. 2019. “Phase Change Material Thermal Energy Storage Systems for Cooling Applications in Buildings: A Review”. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/> (el 21 de marzo de 2023).
- Hayashi, Makoto et al. 2011. “Compilation and use of genetic toxicity historical control data”. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 723(2): 87–90.
- Hsiao, Ming Jer, Chiao Hung Cheng, Ming Chao Huang, y Sih Li Chen. 2009. “Performance enhancement of a subcooled cold storage air conditioning system”. *Energy Conversion and Management* 50(12): 2992–98.
- International Energy Agency, Iea. 2018. “The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable”. [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/) (el 6 de abril de 2023).
- Juan Manuel Franco Lijó. 2006. *Manual de refrigeración*. Reverté. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=F7-dmrTI0TAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=MANUAL+DE+REFRIGERACION+JUAN+MANUEL+FRANCO&ots=HLT0LU-KU0&sig=DCfzae8gdy0MKMHK8ejmnH5Kxtw#v=onepage&q=MANUAL%20DE%20REFRIGERACION%20JUAN%20MANUEL%20FRANCO&f=false> (el 30 de abril de 2023).
- Juengjaroennirachon, Sirisawat, Naris Pratinthong, Pichai Namprakai, y Taveewat Suparos. 2017. “Performance enhancement of air conditioning using thermosyphon system’s energy storage unit for cooling refrigerant before entering the condenser”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 31(1): 393–400. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-016-1241-z> (el 20 de marzo de 2023).
- Kalani, A, SG Kandlikar - Revista internacional de transferencia de calor y masa, y undefined. 2015. “Efecto de la disminución gradual en la recuperación de presión durante la ebullición en flujo en microcanales abiertos con colector utilizando un modelo de flujo homogéneo”. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931014010795> (el 8 de abril de 2023).
- Li, Yan et al. 2017. “Study of a Coil Heat Exchanger with an Ice Storage System”. *Energies* 2017, Vol. 10, Page 1982 10(12): 1982. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/1982/htm> (el 21 de marzo de 2023).
- Naphon, Paisarn. 2010. “On the performance of air conditioner with heat pipe for cooling air in the condenser”. *Energy Conversion and Management* 51(11): 2362–66.
- Naphon, Paisarn, Pichai Assadamongkol, y Teerapong Borirak. 2008. “Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency”. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35(10): 1316–19.
- Ong, K. S., y Md Haider-E-Alahi. 2003. “Performance of a R-134a-filled thermosyphon”. *Applied Thermal Engineering* 23(18): 2373–81.

- Qiao, Yiyuan et al. 2020. “Experimental study of a personal cooling system integrated with phase change material”.
- Radomska, Ewelina, Lukasz Mika, Karol Sztekler, y Lukasz Lis. 2020. “The Impact of Heat Exchangers’ Constructions on the Melting and Solidification Time of Phase Change Materials”. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4840 13(18): 4840. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/18/4840/htm> (el 21 de marzo de 2023).
- San, Jung Yang, Gean Sheng Lin, y Kai Li Pai. 2009. “Performance of a serpentine heat exchanger: Part I – Effectiveness and heat transfer characteristics”. *Applied Thermal Engineering* 29(14–15): 3081–87.
- Sánchez Peña, Landy. 2012. “HOGARES Y CONSUMO ENERGÉTICO EN MÉXICO”. <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>. (el 30 de abril de 2023).
- Shyu, R. J., Andrews, J., Akbarzadeh, A., & Sauciuc, I. 1996. “Heat Pipe Eesearch and Applications in Taiwan. In Heat Pipe Technology: Theory Applications and Prospects”. En Elsevier, Oxford, UK.
- Srimuang, W., S. Rittidech, y B. Bubphachot. 2009. “Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon (VFT)”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23(9): 2548–54. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-009-0703-y> (el 22 de abril de 2023).
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. 1982. *Refrigeration and air conditioning*. New York.: Mc GrawHill Book Co.
- Tecumseh Europe. “Ficha técnica compresor CAE4456Y”.
- Turner, W. J.N., A. Staino, y B. Basu. 2017. “Residential HVAC fault detection using a system identification approach”. *Energy and Buildings* 151: 1–17.
- Xuan, Yimin, Yuping Hong, y Qiang Li. 2004. “Investigation on transient behaviors of flat plate heat pipes”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 28(2–3): 249–55.
- Yau, Yat Huang, y Mohammad Ahmadzadehtalatapeh. 2011. “Predicting yearly energy recovery and dehumidification enhancement with a heat pipe heat exchanger using typical meteorological year data in the tropics”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25(4): 847–53. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-011-0213-6> (el 22 de abril de 2023).