

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

**Comparación de mejoras pasivas sugeridas en relación con la eficiencia de aires acondicionados
automotrices de vehículos livianos**

Juan Camilo Vásquez Osorio

Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM.
Facultad de Ingenierías
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia
2022

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

**Comparación de mejoras pasivas sugeridas en relación con la eficiencia de aires acondicionados
automotrices de vehículos livianos**

Juan Camilo Vásquez Osorio

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

Asesor:

I.M. Adrián Felipe Martínez

Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM.
Facultad de Ingenierías
Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia

2022

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

RESUMEN

Actualmente, uno de los sistemas más relevantes en un vehículo es el sistema de aire acondicionado, el cual tiene como función extraer el calor del habitáculo y generar una sensación de confort. Para lo cual posee un conjunto de componentes que trabajan bajo los criterios de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, donde se utiliza como intermediario un fluido refrigerante con características especiales como: bajo punto de ebullición y evaporación, alta capacidad de absorber y ceder calor, entre otros. Pero este sistema es señalado de aumentar el consumo de combustible durante su funcionamiento y por ende la contaminación ambiental generada debido al uso máximo de combustibles de origen fósil.

Este trabajo tiene como propósito crear las bases teóricas para trabajos futuros en relación con la eficiencia de aires acondicionados automotrices a partir de algunas mejoras pasivas encontradas en la literatura actual, las cuales serán evaluadas desde el punto de vista energético y económico estableciendo sus similitudes y diferencias, con el fin de disminuir el consumo de combustible y el impacto ambiental asociado a su funcionamiento.

Entre las mejoras pasivas encontradas, se destacan: La utilización de fuentes de energía alternativas como la eólica y solar, la utilización y creación de nuevos materiales con alta conductividad térmica o con propiedades aislantes (fibras de plástico, poliéster o minerales) y por último, la creación de nuevos fluidos refrigerantes con mejores propiedades físicas destinados a reducir los efectos causados por la temperatura ambiente sobre el sistema de aire acondicionado automotriz.

Al comparar los resultados obtenidos de las eficiencias máximas de los compresores Tahoe 2009 que trabaja con R134a y Tahoe 2019 que trabaja con R1234yf, pero en este caso se remplazó con R134a, tienen una diferencia de 8.74%, siendo un valor aceptable si se considera que no está trabajando con el refrigerante para el cual fue diseñado.

Palabras claves: aire acondicionado, eficiencia, líquido refrigerante, contaminación ambiental, mejoras pasivas.

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

RECONOCIMIENTOS

Se agradece de ante mano a Dios, por fortalecerme en los tiempos difíciles y crear esperanza en mi corazón; agradezco también a mi familia por su paciencia y amor incondicional debido a las ausencias presentadas durante estos últimos años.

Agradezco a los profesores de Ingeniería Electromecánica del ITM por aportar su granito de arena en la realización de un gran sueño; ser ingeniero, lo cual mejorará mi nivel y calidad de vida.

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

ACRÓNIMOS

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.

Circuito LOW: Circuito de Baja Presión.

Circuito HIGH: Circuito de Alta Presión.

CFC: Clorofluorocarbono.

COP: Coeficiente de Rendimiento.

CO₂: Dióxido de Carbono.

GWP: Potencial de Calentamiento Global.

HCFC: Hidroclorofluorocarbonos.

HFC: Hidrofluorocarbono.

HFC 134a: 1, 1, 1, 2 – Tetrafluoroetano.

HFO: Hidrofluorolefina.

HFO 1234yf: 2, 3, 3, 3 – tetrafluoropropeno.

HP: Caballo de fuerza

K: Grados Kelvin.

°C : Grados Celsius.

ODP: Agotamiento Capa de Ozono.

O₂ : Oxígeno.

O₃: Ozono.

PM: Material particulado

Q_H: Calor cedido por el condensador.

Q_L: Calor absorbido por el evaporador.

RPM: Revoluciones por minuto.

UV: Rayos Ultra violeta.

w_c : Trabajo Específico interno de compresión.

η_c: Eficiencia o rendimiento del Compresor.

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

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
1.1 Objetivo general	21
1.2 Objetivos específicos	21
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 A nivel mundial.	22
2.2 Refrigeración automotriz	22
2.2.1 Funcionamiento.	23
2.3 Mejoras pasivas propuestas para el sistema de aire acondicionados automotriz.	27
2.3.1 Reemplazo del compresor utilizado en el sistema de aire acondicionado automotriz.	27
2.3.2 Cambio del refrigerante por uno con mejores propiedades físicas	31
2.3.3 Mejoramiento del sistema de circulación de aire del habitáculo.	32
2.3.4 Uso de energía alternativas como fuente impulsora.	35
2.3.5 Sustitución del ciclo de refrigeración de compresión de vapor por uno de absorción	36
2.3.6 Cambio del intercambiador de calor (evaporador) por uno de flujo cruzado.	38
3. METODOLOGÍA	40
3.1 Revisión bibliográfica	40
3.2 Análisis de la información	40
3.3 Identificación de la mejora pasiva idónea	40
3.4 Evaluación energética	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 Revisión bibliográfica	41
4.2 Análisis de la información	42
4.3 Identificación de la alternativa idónea	42
4.4 Matriz de ponderación	43
4.5 Análisis energético de las alternativas 1 y 2	44

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

4.6 Análisis de resultados finales	56
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	59
6. REFERENCIAS.....	61
7. ANEXOS	64

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

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes básicos de un aire acondicionado automotriz.	23
Figura 2. Compresor.	23
Figura 3. Evaporador.	24
Figura 4. Condensador.	24
Figura 5. Válvula de expansión.	25
Figura 6. Fluidos refrigerantes utilizados en sistemas de aire acondicionado.	25
Figura 7. Compresor Tahoe convencional.	28
Figura 8. Banco de pruebas utilizado para evaluar el desempeño de los compresores Tahoe.	29
Figura 9. Distribución del aire dentro del habitáculo.	33
Figura 10. Velocímetro laser Doppler.	33
Figura 11. Simulación efectuada en ANSYS 18.	34
Figura 12. Estructura diseñada con los componentes básicos de un sistema de aire acondicionado automotriz para pruebas de funcionamiento.	35
Figura 13. Banco de sistema de refrigeración automotriz.	38
Figura 14. A) Intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado, B) Intercambiador de calor de contraflujo.	39
Figura 15. Conjunto de manómetros utilizados para adquirir los valores de presión.	45
Figura 16. Diagrama de Mollier R134a.	46
Figura 17. Diagrama de Mollier del refrigerante R134yf.	47
Figura 18., Prueba nivel BAJO.	48
Figura 19. Prueba nivel BAJO/MEDIO.	48
Figura 20. Prueba nivel MEDIO.	49
Figura 21. Prueba nivel MEDIO/ALTO.	49
Figura 22. Prueba nivel ALTO.	50
Figura 23. Prueba nivel BAJO.	52
Figura 24. Prueba nivel BAJO/MEDIO.	53
Figura 25. Prueba nivel MEDIO.	53
Figura 26. Prueba nivel MEDIO/ALTO.	54

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

Figura 27. Prueba nivel ALTO..... 54

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

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características del compresor Tahoe 2009 y Tahoe 2019.	29
Tabla 2. Presiones y temperaturas de trabajo del compresor Tahoe 2009 con refrigerante 134a.	30
Tabla 3. Presiones y temperaturas de trabajo del compresor Tahoe 2019 con refrigerante 134a.	30
Tabla 4. Eficiencia de los niveles con el compresor Tahoe 2009 con refrigerante R134a.	30
Tabla 5. Eficiencia de los niveles con el compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a.	30
Tabla 6. Resultados de eficiencia del compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a y R1234yf.	31
Tabla 7. Propiedades del refrigerante 1234yf y del refrigerante 134a.	32
Tabla 8. Comparación del confort de los ocupantes del habitáculo.	34
Tabla 9. Consumo de energía eléctrica de cada componente del sistema.	36
Tabla 10. Información obtenida durante las pruebas realizadas.	39
Tabla 11. Porcentaje asignado a los parámetros identificados.	43
Tabla 12. Diferentes alternativas de mejora encontradas.	43
Tabla 13. Efecto causado según la alternativa de mejora Vs parámetro.	43
Tabla 14. Matriz de ponderación creada para evaluar los parámetros vs alternativas de mejora.	44
Tabla 15. Valores obtenidos de presión y temperatura durante las pruebas realizadas al compresor Tahoe 2009 con refrigerante R134a.	45
Tabla 16. Valores obtenidos de presión y temperatura durante las pruebas realizadas al compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a.	46
Tabla 17. Entalpías del nivel bajo de prueba del compresor Tahoe 2009 con R134a.	48
Tabla 18. Tabla. Entalpías del nivel Bajo/medio del compresor Tahoe 2009 con R134a.	49
Tabla 19. Entalpías de nivel medio del compresor Tahoe 2009 con R134a.	49
Tabla 20. . Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2009 con R134a.	50
Tabla 21. Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2009 con R134a.	50
Tabla 22. Eficiencia, trabajo del compresor, energía absorbida y cedida por el sistema en cada etapa del ciclo de refrigeración con el compresor Tahoe 2009 y refrigerante R134a.	51
Tabla 23. Entalpías del nivel bajo de prueba del compresor Tahoe 2019 con R134a.	52
Tabla 24. Entalpías del nivel Bajo/medio del compresor Tahoe 2019 con R134a.	53
Tabla 25. Entalpías de nivel medio del compresor Tahoe 2019 con R134a.	54

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

Tabla 26. Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2019 con R134a..... 54

Tabla 27. Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2019 con R134a..... 55

Tabla 28. Eficiencia, trabajo del compresor, energía absorbida y cedida por el sistema en cada etapa del ciclo de refrigeración con el compresor Tahoe 2019 y refrigerante R134a. 56

Tabla 29. Eficiencia obtenidas durante las pruebas realizadas a los compresores Tahoe 2009 y 2019 con refrigerante R134a..... 57

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

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Medellín se está presentado un problema ambiental importante relacionado con la calidad del aire debido a la cantidad de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y gases contaminantes generados por su gran parque automotor, el cual aumentó en los últimos 25 años en un 788 %, si a esto, se le suma la topografía del terreno, se tiene un problema ambiental (Informe Anual de Calidad del Aire 2019/ Universidad EAFIT-SIATA). Además, este problema se incrementa cuando en los automóviles ponen en funcionamiento su sistema de aire acondicionado, aumentando el consumo de combustible entre un 5 y 20 % (Motorpasión, 2020) y en contraparte la potencia del motor disminuye y aumenta la contaminación generada.

En la actualidad el confort es fundamental a la hora de seleccionar un vehículo de transporte personal, por esto, la gran mayoría de personas busca una combinación entre: lo bonito, cómodo y económico; impulsando a las empresas fabricantes de vehículos a investigar nuevas formas de aumentar o mejorar las cualidades de los vehículos existentes.

Debido a lo anterior, se propone realizar una revisión sobre mejoras pasivas encontradas en bases de datos, repositorios y tesis de grado, las cuales, pueden ser realizadas en vehículos de transporte liviano, en relación con la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado automotriz, para el aumento del confort de sus ocupantes y reducción del consumo de combustible, debido a su uso.

La investigación fue realizada con base en los conceptos y las fórmulas encontradas durante la revisión realizada en libros, tesis, artículos de revista indexadas, entre otros. Luego, esta información fue utilizada para la creación de la metodología, donde se definieron las actividades a realizar para alcanzar cada uno de los objetivos específicos, con los cuales se lograría el objetivo general que es el análisis y comparación de las mejoras pasivas encontradas en la literatura en relación con la eficiencia energética de aires acondicionados en vehículos livianos. Por último, se encuentran las conclusiones, las cuales servirán como guía para trabajos futuros en relación con el mejoramiento de la eficiencia en sistemas de aire acondicionados automotriz.

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

1.1 Objetivo general

Realizar una Comparación entre las mejoras pasivas sugeridas en relación con la eficiencia de aires acondicionados automotriz para vehículos livianos.

1.2 Objetivos específicos

Recopilar información bibliográfica en bases de datos, repositorios y tesis de grado sobre las posibles mejoras pasivas existentes en la actualidad en relación con la eficiencia de aires acondicionados automotrices de vehículos livianos.

Identificar mediante una matriz morfológica o de ponderación las similitudes existentes entre las diferentes mejoras pasivas encontradas.

Comparar las diferencias y similitudes existentes entre las mejoras pasivas encontradas y verificar el impacto del consumo energético.

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

2. MARCO TEÓRICO

2.1 A nivel mundial.

A nivel mundial es primordial promover proyectos de índole energético, donde se promueve el uso eficiente y racional de la energía. Estos proyectos, están enfocados en la creación o mejoramiento de las máquinas, procesos y sistemas que disminuyen el impacto ambiental generado y optimizan los recursos disponibles (Pinzón, 2013).

Los vehículos automotores actuales son considerados los causantes del 60,7 % de la contaminación ambiental generada a nivel mundial (Europarl, 2019), debido al uso de combustibles fósiles. Por tal motivo, muchas de las investigaciones actuales están direccionadas al mejoramiento de la eficiencia de algunos de sus sistemas, entre los cuales, se encuentran: motor de combustión interna, sistemas de frenado, aire acondicionado, aerodinámica, entre otros.

2.2 Refrigeración automotriz

Uno de los sistemas más estudiados y con múltiples soluciones planteadas, son los sistemas de aire acondicionado, responsables de disminuir la potencia entregada por el motor entre un 5% a 20%, porque estos, toman su energía impulsora del motor (Otero, 2020). Uno de los mayores logros tecnológicos del hombre fue la creación del sistema de aire acondicionado automotriz, el cual permite entregar una temperatura entre los 17°C o 19°C, dando una sensación de confort a bordo de un vehículo. El sistema de aire acondicionado tiene como propósito extraer el calor del habitáculo y expulsarlo al exterior para lo cual utiliza un fluido refrigerante con punto de ebullición bajo y alta conductividad térmica, el cual debe ser amigable con el medio ambiente.

Estos sistemas de aire acondicionado con el pasar de los años han aumentado su eficiencia debido a los avances tecnológicos y la competencia existente entre las diferentes marcas automotrices, los cuales son evaluados periódicamente con el fin de identificar posibles fallas o mejoras en su funcionamiento.

2.2.1 Funcionamiento. Un aire acondicionado funciona mediante la compresión mecánica de una sustancia, la cual es conocida como refrigerante, ésta cambia continuamente de estado (gas a líquido, y de líquido a gas) siempre y cuando el aire acondicionado este encendido. En la Figura 1, se puede visualizar los componentes básicos de un sistema de aire acondicionado automotriz.

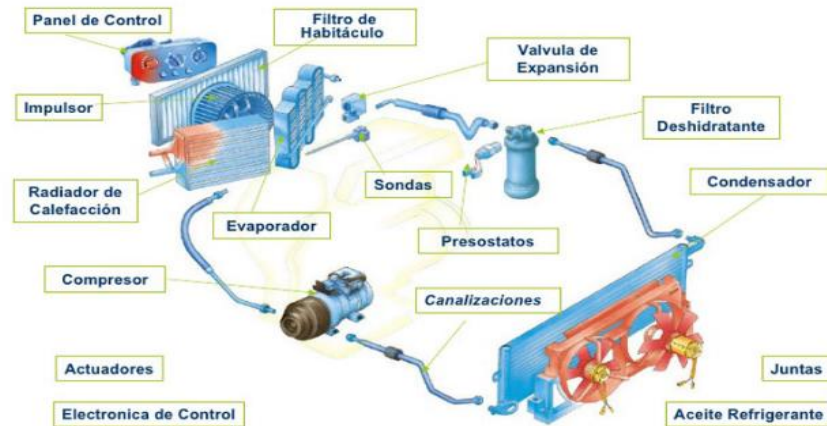


Figura 1. Componentes básicos de un aire acondicionado automotriz.
Fuente: (Lapps.es, 2020).

La mayoría de los vehículos automotrices sin importar la marca poseen componentes similares y operan bajo el mismo ciclo de refrigeración de compresión de vapor, sus diferencias están relacionadas con el tamaño de dichos componentes, como en los electrónicos utilizados, a continuación, se habla de ellos:

El compresor es el dispositivo encargado de aumentar la presión del fluido refrigerante, el cual es impulsado por medio de un sistema de embrague que se conecta al sistema de distribución por medio de una correa. Frecuentemente es un compresor de pistón o recíprocante, el cual sólo trabaja con refrigerante en fase gaseosa, ver Figura 2.



Figura 2. Compresor.
Fuente: (Sanchez, 2016).

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

Tanto el evaporador como el condensador son intercambiadores cuya función principal es permitir la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos que se encuentran a diferente temperatura (Jaramillo, 2007). En la Figura 3, se puede observar un evaporador, este posee una serie de tubos horizontales con aletas, por los cuales circula internamente el refrigerante. Además, utiliza un ventilador que obliga a circular aire a través de este, con el fin de que absorba energía (calor), haciendo que el refrigerante se evapore por completo antes de entrar al compresor. La función básica de estos es recibir el refrigerante a baja temperatura y hacerlo entrar en contacto con el aire del habitáculo por medio de un ventilador recogiendo el calor existente, además absorbe el calor sensible del medio a refrigerar transformándolo en calor latente el cual queda incorporado al refrigerante en estado de vapor (ÇENGEL & BOLES, 2012).

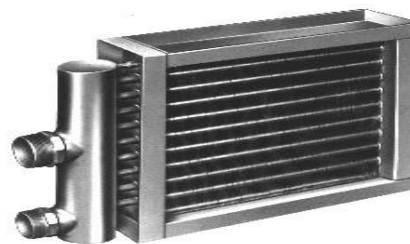


Figura 3. Evaporador.
Fuente: (Salgado, 2010).

El condensador es otro intercambiador de calor, que se encarga de convertir el vapor en líquido, el compresor envía al condensador vapor de refrigerante a alta temperatura y presión el cual será enfriado gracias al intercambio con el aire exterior, este proceso es periódico siempre y cuando esté encendido el sistema; tanto el condensador como el evaporador son intercambiadores de calor de flujo cruzado sin mezcla de fluidos (Hernández, 2012), ver Figura 4.



Figura 4. Condensador.
Fuente: (Portal, 2017).

Otro de sus componentes es la válvula de expansión, cuya función es aprovechar el paso del refrigerante en fase de líquido comprimido para descomprimirlo por medio del tubo capilar y pasarlo a estado gaseoso, bajando su temperatura. Estas válvulas son las encargadas de regular el funcionamiento de los sistemas de refrigeración o de calefacción porque aseguran el suministro regular de refrigerante al evaporador manteniendo un recalentamiento específico (refrigerante a mayor temperatura que la de ebullición) a la salida del evaporador (Danfoss, 2005), ver Figura 5.

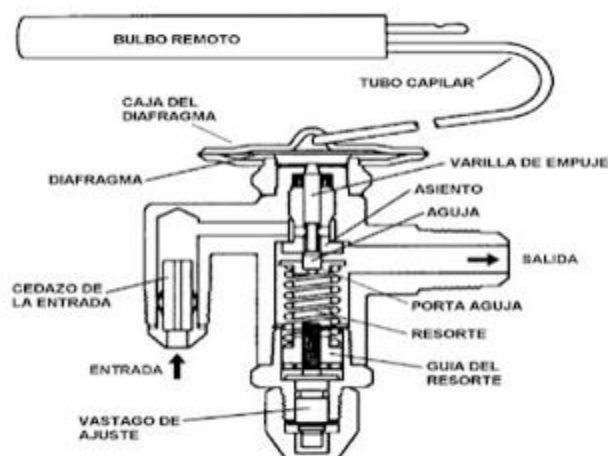


Figura 5. Válvula de expansión.
Fuente: (Danfoss, 2016).

El refrigerante más utilizado hoy en día en el sector automotriz es el R-134a (ver Tabla 1). Este sustituyó al conocido R12 porque afecta menos la capa de ozono. Un refrigerante es una sustancia que tiene la capacidad de transportar e intercambiar energía térmica con el medio ambiente, entregando energía térmica a alta temperatura y absorbiéndola a baja temperatura (Carvajal, 2011), ver Figura 6.



Figura 6. Fluidos refrigerantes utilizados en sistemas de aire acondicionado.
Fuente: (ACI, 2018).

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

Es importante conocer sobre las propiedades del refrigerante o fluido de trabajo, las cuales definen su comportamiento durante el ciclo de refrigeración. A continuación, se mencionan algunas de estas (Asturias, 2021):

1. Masa molecular: es la suma de átomos que componen una molécula de refrigerante.
2. Densidad: propiedad intensiva de la materia y representa la relación existente entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.
3. Viscosidad: característica de un fluido en movimiento, donde muestra tendencia de oposición hacia su flujo, ante la aplicación de una fuerza (Buque, 2007).
4. Conductividad química: es la capacidad que posee un cuerpo para transmitir el calor generado por el movimiento de sus moléculas.
5. Calor específico: es la cantidad de energía calórica que se debe suministrar a determinada masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad.
6. Calor latente de vaporización: es la cantidad de energía requerida por una sustancia que está en fase líquida para pasar a fase gaseosa a presión constante.
7. Entalpia: representa la cantidad de energía térmica o de calor, que se agrega a una sustancia para que ocurran cambio de estado y de fase (Refrigerantes, 2021).

El refrigerante R134a sustituyó al refrigerante R-12 desde hace 27 años, posee bajo potencial de destrucción de la capa de Ozono, no posee cloro en su molécula, no es inflamable a presión atmosférica o a temperaturas por debajo de los 100° C y permite su fácil identificación cuando existen fugas. (Vaguela, 2016).

Algunas de las ecuaciones utilizadas para calcular el calor cedido y ganado, el trabajo realizado por el compresor y su eficiencia, se describen a continuación:

La eficiencia del compresor se puede calcular con:

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

El trabajo realizado por el compresor:

$$W_c = h_2 - h_1$$

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

El calor cedido por el condensador:

$$\frac{Q_H^o}{q_c} = h_2 - h_3$$

El calor absorbido en el evaporador:

$$\frac{Q_L^o}{q_e} = h_1 - h_4$$

COP del evaporador:

$$COP_{evaporador} = \frac{q_e}{W_c}$$

COP del condensador:

$$COP_{condensador} = \frac{q_c}{W_c}$$

2.3 Mejoras pasivas propuestas para el sistema de aire acondicionados automotriz.

Una mejora pasiva es una serie de actividades que se pueden realizar a equipos, máquinas u objetos las cuales tienen como propósito mejorar su funcionamiento sin afectar considerablemente su estructura o composición. A continuación, se describen algunas de las mejoras pasivas encontradas en la literatura actual durante la búsqueda de bibliografía realizada en relación con el mejoramiento de la eficiencia en sistemas de aire acondicionado automotriz:

2.3.1 Reemplazo del compresor utilizado en el sistema de aire acondicionado automotriz. La primera mejora pasiva encontrada en la revisión bibliográfica realizada fue la de José Luis Saltos Altamirano, el cuál realizó pruebas de funcionamiento a un sistema de aire acondicionado automotriz. Estas pruebas tenían como finalidad probar el funcionamiento del sistema cambiando el compresor Tahoe 2009 por el nuevo modelo Tahoe 2019, los compresores utilizados durante las pruebas del proyecto fueron de una camioneta Chevrolet Tahoe. Ver Figura 7.

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



Figura 7. Compresor Tahoe convencional.
Fuente: (AutoZone, 2021).

Para estudiar la viabilidad de esta mejora, se realizaron dos análisis simultáneos: el primero, consistió en evaluar la eficiencia del sistema de aire acondicionado actual que trabaja con un compresor Tahoe 2009 y refrigerante R134a y luego se cambiará el compresor Tahoe 2009 por uno Tahoe 2019 que trabaja con refrigerante R1234yf y el cual fue sustituido por R134a. Para esto, se midieron los valores correspondientes de temperatura y presión a la entrada y salida del compresor como del evaporador y del condensador (Altamirano, 2020).

Posteriormente, con los datos de temperatura y presión obtenidos, se identificaron las entalpías de cada estado en el diagrama de Mollier (Presión vs entalpia), tanto para el refrigerante R134a, como para el refrigerante R1234yf. Por otra parte, con el fin de obtener mayor veracidad del resultado, este proceso, se realizó con cinco niveles de diferentes de operación: bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto (Altamirano, 2020).

Un nivel apagado, indica que el sistema no está en funcionamiento o el compresor no está trabajando. En este nivel las presiones del circuito de baja y alta, poseen valores iguales. El nivel bajo, se caracteriza porque el compresor trabaja durante intervalos de tiempo, donde las presiones del circuito de baja como de alta, poseen valores mínimos, el termostato está desactivado porque no se alcanza la temperatura de activación en el evaporador. El nivel bajo/medio, los valores de las presiones son semejantes a las del nivel bajo y el compresor trabaja en intervalos de tiempo más prolongados que en el nivel anterior. El nivel medio, es el nivel donde las presiones comienzan a ser más elevadas, lo cual permite diferenciar de los anteriores niveles, porque el compresor trabaja en intervalos de tiempo más largos. El nivel

medio/alto, el compresor trabaja durante caso todo el tiempo y por tal motivo se generan presiones mucho más altas (Altamirano, 2020).

El nivel alto, es el último nivel de prueba, el compresor trabaja por variaciones de tiempo superiores a los anteriores niveles mencionados, en este nivel las presiones tanto del circuito de baja como el circuito de alto son las más elevadas que puede alcanzar el sistema y es donde el termostato trabaja todo el tiempo activando y desactivando el compresor cada vez que la temperatura este por debajo de la programada.

En la Tabla 1, se ilustran las características de cada uno de los compresores utilizados en las pruebas:

Tabla 1. Características del compresor Tahoe 2009 y Tahoe 2019.

Características	Tahoe 2009	Tahoe 2019
Ranuras(Groove)	6	4
Refrigerante	R134a	R1234yf
Voltaje	12 v	12 v
Diámetro de la polea	108 mm	110 mm
Diámetro del embrague	110 mm	115 mm
Caudal	150 cm ³	170 cm ³
Potencia	3 hp	4 hp
Tipo de lubricante	PAG 46	PAG 46

Fuente: (Altamirano, 2020).

El segundo compresor es una Tahoe 2019, el cual trabaja con el nuevo refrigerante 1234yf, pero este refrigerante no es comercial en Suramérica, lo cual sería un inconveniente a la hora de realizar un cambio o reparación en el sistema. Durante las pruebas ambos compresores fueron impulsados por un motor eléctrico de 1 HP. A continuación, se visualiza el banco de pruebas utilizados por Altamirano para el proyecto el cual cuenta con sensores de temperatura y manómetros de presión digitales, ver Figura 8.



Figura 8. Banco de pruebas utilizado para evaluar el desempeño de los compresores Tahoe.

Fuente: (Altamirano, 2020).

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

En las Tablas 2 y 3 se pueden observar los resultados obtenidos:

Tabla 2. Temperaturas y presiones de trabajo del compresor Tahoe 2009 con refrigerante 134a.

ESTADO	Presión baja [PSI]	Temperatura baja [°C]	Presión alta [PSI]	Temperatura alta [°C]
Apagado	51.0	12.6	55.1	14.5
Bajo	17.5	-7.5	150.5	44.3
Bajo/Medio	18.1	-6.3	143.7	42.7
Medio	19.5	-5.8	142.5	42.5
Medio/Alto	21.4	-4.5	138.0	41.3
Alta	24.3	-2.4	132.7	40.0

Fuente: (Altamirano, 2020).

Tabla 3. Temperaturas y Presiones de trabajo del compresor Tahoe 2019 con refrigerante 134a.

ESTADO	Presión baja [PSI]	Temperatura baja [°C]	Presión alta [PSI]	Temperatura alta [°C]
Apagado	52.0	13.0	56.9	15.4
Bajo	10.5	-13.7	90.4	27.9
Bajo/Medio	14.6	-10.0	92.6	28.6
Medio	15.8	-9.0	93.2	28.8
Medio/Alto	26.5	-0.9	103.3	32.0
Alta	29.0	-0.7	122.9	37.5

Fuente: (Altamirano, 2020).

A partir de estos resultados, se identificaron las entalpías de cada nivel del sistema en el diagrama de Mollier y a su vez se cuantifico la eficiencia del sistema en cada uno de los niveles, ver Tabla 4 y 5:

Tabla 4. Eficiencia de los diferentes niveles evaluados con el compresor Tahoe 2009 con refrigerante R134a.

NIVEL	Nc (%)	Wc (kJ/kg)	QH (kJ/kg)	QL (kJ/kg)	COP/qc	COP/qe
BAJO	80	35	170	135	4.85	3.85
BAJO/MEDIO	81.81	33	171	137	5.18	4.18
MEDIO	78.78	33	172	139	5.21	4.21
MEDIO/ALTO	73.33	30	175	145	5.83	4.83
ALTO	74.07	27	173	146	6.4	5.4

Fuente: (Altamirano, 2020).

Tabla 5. Eficiencia de los diferentes niveles evaluados con el compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a.

NIVEL	Nc (%)	Wc (kJ/kg)	QH (kJ/kg)	QL (kJ/kg)	COP/qc	COP/qe
BAJO	68.96	29	187	158	6.4	5.4
BAJO/MEDIO	73.07	26	182	156	7	6
MEDIO	74.07	27	182	155	6.74	5.74
MEDIO/ALTO	75	20	176	156	8.8	7.8
ALTO	71.42	21	172	151	8.19	5.4

Fuente: (Altamirano, 2020).

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

Con los datos obtenidos y escritos en las Tablas 4 y 5, se puede concluir que las menores eficiencias de cada compresor se obtienen en el nivel ALTO para el Tahoe 2009 y BAJO para el Tahoe 2019. Además, que las mayores eficiencias se logran BAJO/MEDIO para el Tahoe 2009 y MEDIO/ALTO para el Tahoe 2019. Esto le permitió concluir a Altamirano que en los niveles MEDIO a ALTO se puede trabajar con cualquiera de los dos refrigerantes R134a o R1234yf y la eficiencia del sistema no cambia mucho.

2.3.2 Cambio del refrigerante por uno con mejores propiedades físicas. La segunda mejora pasiva planteada consistió en cambiar el refrigerante R1234yf utilizado por el compresor Tahoe 2019 por refrigerante R134a. Debido a que el refrigerante R1234yf no es comercial y debe ser importado, además, para esto se debe poseer una licencia especial, lo cual, impediría cualquier reparación de alguno de los componentes del sistema de refrigeración. Por tal motivo, para las pruebas de verificación y comparación, se realizaron pruebas con el compresor Tahoe 2019 en el mismo sistema, pero utilizando como refrigerante de trabajo R134a, obteniendo los siguientes resultados, ver Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de eficiencia del compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a y R1234yf.

Nivel	R134a	R1234yf
bajo	80,00%	68,96%
bajo/medio	81,81%	73,35%
medio	78,78%	74,07%
medio/alto	73,33%	75,00%
alto	74,07%	71,42%
promedio	77,60%	72,56%

Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Tabla 6, se pueden ver las diferencias existentes entre las eficiencias obtenidas en los cinco puntos de prueba, con lo cual, se pudo calcular una eficiencia promedio, por ejemplo: el compresor Tahoe 2019 trabajando con refrigerante R134a tiene una eficiencia de 77,60 % y trabajando con R1234yf tiene una eficiencia de 72,56 %, dando como resultado una diferencia del 5,04%, lo cual, no es muy representativa en comparación con su costos y facilidad de adquisición.

El interés por el nuevo refrigerante R1234yf es por su bajo impacto ambiental y tiempo de degradación en la atmósfera el cual es de 11 días, mientras que el del R134a es de 14 años. (Mota Babiloni, Mendoza Miranda, & Navarro Esbrí, 2012).

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

En la Tabla 7, se pueden observar las propiedades más relevantes de cada uno de estos refrigerantes (Leck , 2009):

Tabla 7. Propiedades del refrigerante 1234yf y del refrigerante 134a.

PROPIEDADES	R1234yf	R134a
Formula	CF ₃ CF = CH ₂	CH ₂ FCF ₃
Peso Molecular	114	102
ODP	0	0
GWP (100 años)	4	1430
Punto de ebullición K	244.15	247.15
Punto crítico K	368.15	375.15
Presión de evaporación 298.15 K (MPa)	0.677	0.665
Presión de condensación 353.15 K (MPa)	2.44	2.63
Densidad del líquido 298.15 K (kg/m ³)	1094	1207
Densidad del vapor 298.15 K (kg/m ³)	37.6	32.4
Viscosidad del líquido 298.15 K (μPa/s)	155.45	194.89
Viscosidad del vapor 298.15 K (μPa/s)	12.291	11.693
Conductividad térmica del líquido 298.15 K (W/m K)	63.585	81.134
Conductividad térmica del vapor 298.15 K (W/m K)	13.966	13.825
Calor específico del líquido 298.15 K (kJ/kg K)	1.3921	1.4246
Calor específico del vapor 298.15 K (kJ/kg K)	1.0533	1.0316

Fuente: (Mota Babiloni, Mendoza Miranda, & Navarro Esbrí, 2012).

En la Tabla 7, se puede visualizar que algunas propiedades no varían considerablemente, pero otras si, como es el caso de la densidad que presenta una variación de 113 kg/m³, viscosidad del líquido con una variación de 39.44 μPa/s y la conductividad térmica del líquido con una variación de 17.629 W/m.K, donde todos estos valores se encuentran a una temperatura de 298.15 K. Esto indica que el refrigerante R134a no fluye tan fácilmente, pero posee mayor conductividad debido a que sus moléculas están más unidas. (Mota Babiloni, Mendoza Miranda, & Navarro Esbrí, 2012).

2.3.3 Mejoramamiento del sistema de circulación de aire del habitáculo. Otra de las mejoras pasivas encontradas en la revisión es un artículo llamado “Estudio experimental y numérico de la distribución del aire dentro de la cabina de un automóvil”, donde se estudió mediante un software de simulación numérica, la distribución del flujo de aire generada dentro del habitáculo y como esta impacta en el consumo de combustible. Por ejemplo, los diseñadores de vehículos Chevrolet, no consideran en sus diseños la distribución del aire dentro del vehículo. En la Figura 9, se puede apreciar dicha distribución.

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



Figura 9. Distribución del aire dentro del habitáculo.
Fuente: (Nois, 2017).

Para este análisis, se partió de la velocidad del flujo de aire que sale por las rejillas y entra al habitáculo, la cual fue medida por un velocímetro láser Doppler (Danca, 2014). En la Figura 10, se puede apreciar este equipo.

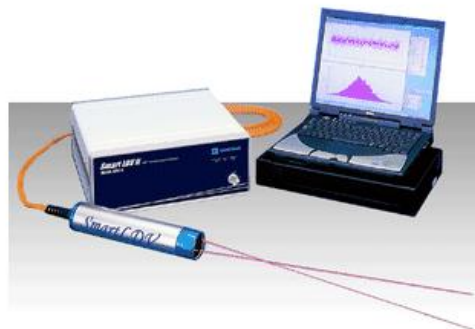


Figura 10. Velocímetro laser Doppler.
Fuente: (Steriltech, 2012).

Para este análisis, se tomó como referencia el interior de un vehículo Tahoe 2019, el cual, se realizó en el software ANSYS. Se probaron varias mallas con elementos tetraédricos para verificar la veracidad de la solución y la simulación numérica, se realizó en ANSYS Workbench, (Danca, 2014).

Para evaluar los efectos de estas diferentes condiciones del contorno, se consideraron 16 puntos de comparación, estos puntos se ubicaron a los niveles de la cabeza, pecho, rodillas y pies en el lugar de los pasajeros, dado en cada nivel, tiene los 4 puntos en donde están ubicados el conductor y tres pasajeros, los datos son tomados por un software de simulación numérica aplicado, ver Figura 11.

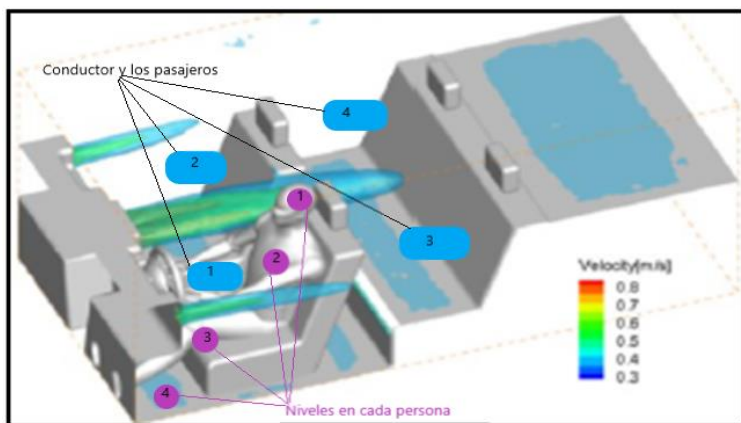


Figura 11. Simulación efectuada en ANSYS 18.
Fuente: (Danca, 2014).

En la Tabla 8, se realizó la comparación entre las velocidades y las temperaturas locales del aire para ambos casos, donde CV (velocidad de entrada uniforme) y RV (velocidad de entrada real). En esta, se presentan los valores para los índices PMV (Predicted Mean Vote) Opinión media estimada y PPD (Porcentaje de personas insatisfechas) opinión de porcentaje insatisfecho, obtenidos en los pasajeros dentro de la cabina, las mediciones se realizan en cabeza, pecho, rodillas y pies respectivamente.

Tabla 8. Comparación del confort de los ocupantes del habitáculo.

Punto / Parámetro	Point / Parameter	CV	RV	CV	RV
		PMV (%)		PPD(%)	
Cabeza del conductor	Driver Head	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Cabeza de pasajero	Passenger Head	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Cabezal de pasajero trasero derecho	Rear right pass head	-0,5	-0,6	11,2	13,7
Cabezal de pasajero trasero izquierdo	Rear left pass head	-0,5	-0,9	11,2	21,9
Pecho del conductor	Driver Chest	-0,5	-0,7	11,2	14,1
Pecho de pasajero	Passenger Chest	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Pecho de pasajero trasero derecho	Rear right pass Chest	-0,5	-0,7	11,2	14,6
Pecho de pasajero trasero izquierdo	Rear left pass Chest	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Rodilla del conductor	Driver Knee	-0,5	-0,7	11,2	14,9
Rodilla de pasajero	Passenger Knee	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Rodilla trasera derecha pasajero	Rear right pass Knee	-0,6	-0,6	11,9	12,5
Rodilla trasera izquierda pasajero	Rear left pass Knee	-0,6	-0,8	12,5	17,1
Pie del conductor	Driver Foot	-0,5	-0,5	11,2	11,2

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

Pie de pasajero	Passenger Foot	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Pie de pasajero trasero derecho	Rear right pass Foot	-0,5	-0,5	11,2	11,2
Pie de pasajero trasero izquierdo	Rear left pass Foot	-0,5	-0,5	11,2	11,2

Fuente: (Danca, 2014).

2.3.4 Uso de energía alternativas como fuente impulsora. Una de las mejoras pasivas más tentadoras propuestas en la actualidad es la implementación o uso de energías alternativas como la eólica o solar fotovoltaica, las cuales serían las encargadas de impulsar el sistema de aire acondicionado automotriz. Otra de las investigaciones realizada fue la del estudiante Clauss Benites para optar al título de ingeniero automotriz de la universidad tecnológica Equinoccial de Quito Perú, evalúa la posibilidad de utilizar energía solar fotovoltaica como fuente impulsora.

Para lo cual se diseñó una estructura metálica destinada a soportar los componentes básicos de un sistema de aire acondicionado automotriz convencional, ver Figura 12.



Figura 12. Estructura diseñada con los componentes básicos de un sistema de aire acondicionado automotriz para pruebas de funcionamiento.

Fuente: (Benites C. , 2016).

Este sistema diseñado tiene como propósito simular el funcionamiento de un aire acondicionado automotriz pero impulsado con la energía eléctrica producida a partir de un sistema solar fotovoltaico. El sistema de generación a partir de las celdas solares está ubicado en la parte superior de la estructura metálica, mientras que en la parte media se encuentran ubicados los elementos básicos del sistema de aire acondicionado juntamente con el controlador de carga que regula la carga y descarga de la batería. (Benites C. , 2016).

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

Para saber si esta alternativa es viable o no, se realizaron los cálculos de la energía consumida por cada uno de los componentes durante su funcionamiento, lo cual permite evaluar simultáneamente las dimensiones del sistema solar fotovoltaico requerido, ver Tabla 9.

Tabla 9. Consumo de energía eléctrica de cada componente del sistema.

Cantidad	Carga	Potencia (W)	# de horas funcionamiento	Energía Total necesaria en (Wh)
1	Ventilador condensador (DC)	100	2	200
1	Ventilador evaporador (DC)	60	2	120
1	Embrague eléctrico (DC)	42	2	84
1	Motor eléctrico (AC)	1491.4	2	2982.8
Total				3386.8

Fuente: (Benites C. , 2016).

Después de realizar varias pruebas en el simulador a diferentes horas del día se llegó a la conclusión de que el sistema de aire acondicionado automotriz no puede ser alimentado o impulsado por un solo panel solar debido a que la energía generada por este es muy poca. Después de realizar algunos cálculos se pudo identificar que se necesitarían paneles solares (8 en total) de 120 Watts de potencia y con medidas de 1.48m x 0.67m cada uno, sus dimensiones cubrirían gran parte de la zona superior de un vehículo lo que dificultaría su circulación por las normas de movilidad en la ciudad y una pérdida de aerodinámica, junto con el elevado costo que conlleva el sistema (Benites C. , 2016).

2.3.5 Sustitución del ciclo de refrigeración de compresión de vapor por uno de absorción. Otra de las mejoras pasivas propuestas es cambiar el ciclo de refrigeración de compresión de vapor utilizado actualmente por uno de absorción, el cual difiere del anterior porque este no necesita de una fuente de energía (batería), sino de un foco de energía térmica.

El trabajo de grado realizado por el estudiante Lusverly Luis Moro para optar al título de ingeniero mecánico electricista de la universidad Cesar Vallejo de Chiclayo Perú, evalúa la posibilidad de realizar este cambio, aprovechando la energía térmica residual del sistema de refrigeración del motor (radiador) como fuente impulsora (Moro L., 2019).

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

El trabajo de grado realizado por el estudiante Lusverly Luis Moro para optar al título de ingeniero mecánico electricista de la universidad Cesar Vallejo de Chiclayo Perú, evalúa la posibilidad de realizar este cambio, aprovechando la energía térmica residual del sistema de refrigeración del motor (radiador) como fuente impulsora (Moro L. , 2019).

El estudio se inicia determinando la carga térmica a extraer del habitáculo para lo cual se utilizaron las ecuaciones de transferencia de calor por conducción, convección y radiación bajo los siguientes parámetros establecidos: temperatura ambiente de la ciudad, un máximo de 5 personas en el interior del vehículo, y una temperatura de climatización entre 18 y 21 °C. Esto permitió cuantificar la energía térmica transferida por el techo, ventanas y puertas hacia su interior, logrando establecer que se debe extraer 1608.29 Watt de energía térmica para crear una sensación de confort. Simultáneamente se realizó un análisis termodinámico de la primera Ley en cada uno de los dispositivos del sistema, como es el caso del Colector de Calor (Radiador) para conocer la energía térmica disponible para ser utilizada en el ciclo por absorción (Moro L. , 2019).

Así mismo se realizó el dimensionamiento del elemento encargado de captar la energía térmica del motor de combustión interna es un intercambiador. El diseño o geometría del intercambiador fue determinada mediante la utilización de una matriz morfológica, la cual indico que el idóneo seria uno de corazas y tubos, estableciendo que por el lado de la coraza debe circular el agua caliente proveniente del motor y por el lado de los tubos el fluido utilizado por el sistema de refrigeración por absorción. Finalmente se hizo el análisis económico, utilizando indicadores como la tasa interna de retorno, el valor actual neto y la relación beneficio / costo.

Después de todo, se pudo comprobar que para realizar este cambio de ciclo se necesita un espacio considerable de 3,12 m para ubicar el intercambiador que servirá como foco de energía, además se requiere de un serpentín con un área de 0,062 m² y una temperatura media logarítmica con un valor de 56.91°C. Haciendo que el espacio limitado del vehículo haga inviable esta alternativa y promueva una nueva investigación en la cual se utilicen los gases producto de la combustión como foco de energía térmica. (Moro L. , 2019).

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

2.3.6 Cambio del intercambiador de calor (evaporador) por uno de flujo cruzado. Por último, se encuentra la mejora pasiva consistente en el cambio de uno de los intercambiadores (evaporador) que posee el sistema de aire acondicionado automotriz. Los cuales son encargados de permitir la transferencia de calor entre el aire circundante y el fluido refrigerante.

El trabajo de grado realizado por los estudiantes Fernando Angulo y Luis Muñoz para optar al título de ingeniero automotriz de la universidad Chimborazo Riobamba Ecuador, evalúan el cambio del tipo de intercambiador utilizado en el evaporador que es de flujo cruzado por uno en contraflujo en un banco de pruebas perteneciente a la universidad, ver Figura 13.



Figura 13. Banco de sistema de refrigeración automotriz.
Fuente: (Angulo & Muñoz, 2017).

El evaporador fue remplazado por un intercambiador de contraflujo, ver Figura 14.

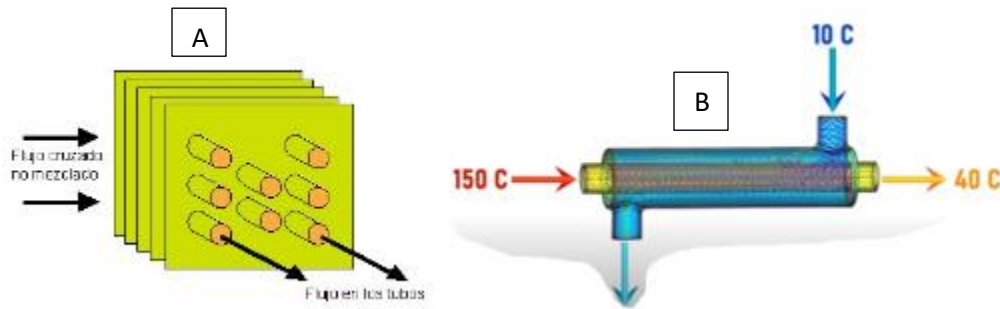


Figura 14. A) Intercambiador de calor de flujo cruzado no mezclado, B) Intercambiador de calor de contraflujo.
Fuente: (UNAM, 2007).

La prueba consistió en cambiar el intercambiador utilizado actualmente como evaporador en el sistema por uno de flujo cruzado y por medio de sensores para obtener los valores de temperatura y presión en cada uno de los puntos del ciclo de refrigeración, ver Tabla 10.

Tabla 10. Información obtenida durante las pruebas realizadas.

Intercambiador de calor de flujo cruzado sin mezcla		Intercambiador de calor de contraflujo		
Puntos	Entropía (S)	Entalpia (h)	Entropía (S)	Entalpia (h)
1	0,9269	243,1	0,9288	245,3
2	0,9083	270	0,9088	271,5
3	0,362	100	0,362	106
4	0,219	45,46	0,219	47,4
COP	7,359		7,549	

Fuente: (UNAM, 2007).

Uno de los propósitos directos de esta prueba era evaluar si la eficiencia del sistema de aire acondicionado automotriz aumentaba con el cambio de geometría del evaporador o intercambiador, para lo cual se pudo corroborar que la eficiencia del sistema aumenta entre un 2 % a 3%, según los resultados analógicos y entre un 3 % a 4 % según los valores digitales (UNAM, 2007).

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

3. METODOLOGÍA

El objetivo principal del proyecto era realizar una comparación entre las mejoras pasivas encontradas en las bases de datos en relación con el mejoramiento de la eficiencia en aires acondicionados automotrices para establecer cuál es la más indicada. Para esto, se realizaron las siguientes actividades:

3.1 Revisión bibliográfica

La primera actividad realizada consistió en una búsqueda bibliográfica en sitios web (Google académico), revistas indexadas (Scielo, ScienceDirect), libros y repositorios de tesis de ingeniería sobre todo lo relacionado con aires acondicionados automotrices. Para esto, se identificaron primero un conjunto de palabras claves que facilitan la búsqueda y reducen los resultados en relación con la eficiencia en aires acondicionados automotrices.

3.2 Análisis de la información

Posteriormente, con base a la información encontrada, se creó el marco teórico donde la información fue organizada para identificar las ventajas y desventajas de cada mejora pasiva, lo cual facilitó posteriormente la evaluación de parámetros como: económico, de mantenimiento, espacio requerido, facilidad para su implementación e impacto ambiental generado.

3.3 Identificación de la mejora pasiva idónea

La tercera actividad consistió en asignar valores porcentuales a cada parámetro mencionado anteriormente. Luego de asignar estos valores porcentuales, se procedió a crear una matriz de ponderación donde cada mejora pasiva encontrada es evaluada juntamente con dichos parámetros para obtener la alternativa más idónea.

3.4 Evaluación energética

Por último, después de obtener la mejora pasiva idónea esta fue evaluada desde el punto de vista energético para comprobar el impacto ambiental obtenido.

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la generación de los resultados, se tuvo en cuenta la metodología planteada en el capítulo 3, la cual permitió dar cumplimiento de los objetivos específicos y a su vez el objetivo general que era realizar una comparación entre las mejoras pasivas encontradas en relación con la eficiencia de aires acondicionados automotrices en vehículos livianos. A continuación, se describe de forma detallada cada una de las actividades realizadas para dar cumplimiento al objetivo general e identificar la alternativa más idónea encontrada en la literatura.

4.1 Revisión bibliográfica

Esta actividad tenía como objetivo recopilar información bibliográfica de bases de datos institucionales, repositorios de tesis de grado, libros y sitios web, sobre todo lo relacionado con los sistemas de aire acondicionado automotriz en vehículos livianos y las posibles mejoras pasivas propuestas para el mejoramiento de su eficiencia. Para la búsqueda se utilizaron palabras claves como: eficiencia, ciclo de refrigeración por compresión de vapor, aire acondicionado automotriz, entre otras.

Como resultado de esta búsqueda, se obtuvieron los conceptos básicos y definiciones en relación con el ciclo de refrigeración por compresión de vapor utilizado por los sistemas de aire acondicionado automotriz como de las posibles mejoras a implementar con el fin de mejorar su eficiencia, lo cual permitió la creación del marco teórico descrito en el capítulo 2, el cual a su vez sirviendo como punto de partida para el análisis de información y desarrollo del trabajo, tratando en lo posible de mostrar las ventajas y desventaja de cada una de estas mejoras pasivas como de las conclusiones obtenidas. A continuación, se enumeran las mejoras pasivas encontradas durante la búsqueda bibliográfica:

1. Reemplazo del compresor Tahoe 2009 por un Tahoe 2019 utilizado por el sistema de aire acondicionado automotriz en vehículos livianos.
2. Cambio de refrigerante del compresor Tahoe 2019 que trabaja con R1234yf con mejores propiedades físicas y reduce el impacto ambiental generado por refrigerante R134a.
3. Mejoramiento del sistema de circulación de aire del habitáculo mediante simulaciones con el software ANSYS.

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

4. Uso de una fuente de energía alternativa como la solar fotovoltaica como fuente impulsora del sistema de aire acondicionado automotriz.
5. Sustitución del ciclo de refrigeración de compresión de vapor por uno de absorción, el cual no necesita de una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento (batería), sino una fuente de calor (radiador o gases de escape).
6. Cambio del intercambiador de calor (evaporador) por uno de flujo cruzado, esto se relaciona con la forma como los fluidos interactúan dentro del equipo.

4.2 Análisis de la información

A continuación, se describe como fue realizado el proceso de análisis de la información encontrada durante la investigación realizada:

Primero que todo, se encontró información referente a la problemática ambiental actual existente, debido al uso de refrigerantes hidroclorofluorocarbonados utilizados en la etapa de compresión de vapor, destinados a la producción de frío y se presentan distintos candidatos con bajo GWP y nulo ODP para la sustitución de los actuales refrigerantes HFC, en concreto del R134a. Además, se encontraron investigaciones relacionadas con el uso del R1234a y su posible sustitución por R134yf y la propuesta de cambio de algunos de los componentes del ciclo e implementación de otras fuentes de energía impulsora del sistema. La información encontrada fue analizada y descrita en el siguiente orden: Autor, introducción a dicha alternativa, procedimiento realizado, resultados obtenidos y conclusiones.

4.3 Identificación de la alternativa idónea

Mediante la búsqueda realizada, se pudo obtener amplia información sobre las diferentes alternativas de mejora existentes en la actualidad como de sus componentes y características de funcionamiento, esta información fue organizada y clasificada, permitiendo identificar las características más relevantes de cada una, lo cual quedo registrada en el marco teórico.

Para la identificación de la alternativa idónea, primero se asignaron valores porcentuales a cada uno de los parámetros identificados durante la búsqueda bibliográfica, ver Tabla 12.

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

Tabla 11. Porcentaje asignado a los parámetros identificados.

PARÁMETRO	PORCENTAJE ASIGNADO		
	Bajo	Medio	Alto
MANTENIMIENTO	0,2	0,15	0,1
COSTO	0,1	0,15	0,2
ESPACIO REQUERIDO	0,1	0,15	0,2
FACIL IMPLEMENTACIÓN	0,1	0,15	0,2
IMPACTO AMBIENTAL	0,1	0,2	0,3

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12, se visualizan los parámetros tomados como referencia para la evaluación de la alternativa idónea: economía, mantenimiento requerido, el espacio requerido, facilidad para su implementación e impacto ambiental generado.

A continuación, se establece cada una de las alternativas de solución encontradas, ver Tabla 13.

Tabla 12. Diferentes alternativas de mejora encontradas.

ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	ALTERNATIVA 5	ALTERNATIVA 6
Cambio de compresor	Cambio de refrigerante	Circulación de aire	Uso de energía alternativa	Cambio del ciclo de refrigeración	Cambio de intercambiador evaporador

Fuente: Elaboración Propia.

Luego de tener identificados y asignado los valores porcentuales de cada uno de los parámetros a evaluar, se procedió a definir el efecto causado por cada una de las alternativas de mejora sobre dichos parámetros, ver Tabla 13.

Tabla 13. Efecto causado según la alternativa de mejora Vs parámetro.

PARÁMETRO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	ALTERNATIVA 5	ALTERNATIVA 6
MANTENIMIENTO	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto	Bajo
COSTO	Medio	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio
ESPACIO REQUERIDO	Bajo	Bajo	Alto	Mediano	Alto	Bajo
IMPLEMENTACIÓN	Medio	Bajo	Alto	Medio	Medio	Bajo
IMPACTO AMBIENTAL	Mediana	Alto	Alto	Alto	Medio	Medio

Fuente: Elaboración Propia.

4.4 Matriz de ponderación

Luego de tener definidos los parámetros más relevantes de las alternativas de mejoras propuestas para sistemas de aire acondicionado automotriz, se procedió a crear la matriz de ponderación. La matriz

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

de ponderación creada, se puede visualizar en la Tabla 14, la cual, está compuesta por 6 columnas (alternativas de mejora) y 6 filas (parámetros). Los cuales, fueron evaluados para obtener un valor total.

Tabla 14. Matriz de ponderación creada para evaluar los parámetros vs alternativas de mejora.

PARÁMETRO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	ALTERNATIVA 5	ALTERNATIVA 6
MANTENIMIENTO	0,2	0,2	0,15	0,2	0,2	0,1
COSTO	0,15	0,1	0,2	0,2	0,2	0,15
ESPACIO REQUERIDO	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
IMPLEMENTACIÓN	0,15	0,1	0,2	0,1	0,15	0,05
IMPACTO AMBIENTAL	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
TOTAL	0,80	0,80	1,05	1,0	0,95	0,6

Fuente: Elaboración propia.

La alternativa cuyo resultado se aproxime a la unidad (1) sería la alternativa idónea, señalando que las alternativas 4 y 5 podrían ser la ideal, pero si se analiza más a fondo, se puede apreciar que su costo es alto y generan un impacto ambiental medio. Mientras que las alternativas 1 y 2 su total es 0,8 lo cual se aleja del valor deseado, pero su costo es bajo y su impacto ambiental es alto, si se evalúa la posibilidad de implementación de cualquiera de estas mejoras, no se puede pasar por alto el costo vs beneficio, indicando que la alternativa idónea podría ser la 1 o la 2, o porque no, una combinación de estas.

Como se puede apreciar las alternativas 1 y 2 se pueden combinar, la alternativa 1 consiste en el cambio del compresor utilizado por el sistema de aire acondicionado actual Tahoe 2009 por uno Tahoe 2019 y la alternativa 2 consiste en cambiar el refrigerante actual utilizado por el sistema de aire acondicionado R134a por uno más amigable con el medio ambiente R134yf. Por tal motivo el trabajo o investigación realizado por José Luis Altamirano toma relevancia por combinar estas dos alternativas de mejora facilitando su evaluación energética.

4.5 Análisis energético de las alternativas 1 y 2

El análisis de los resultados finales de estas alternativas fue realizado con un banco de pruebas que cuenta con todos los componentes básicos de un sistema de aire acondicionado a automotriz descritos en el marco teórico, el cual es impulsado por un motor eléctrico de 1 hp y conectado al compresor por un sistema de transmisión por correa en V.

Para poder realizar la evaluación energética respectiva entre el compresor Tahoe 2009 con R134a y el compresor Tahoe 2019 con R1234yf, se tomaron datos de presión y temperatura en los diferentes puntos del ciclo de refrigeración, para lo cual se utilizó manómetros de presión de tubo bordón de los comunes utilizados en refrigeración automotriz, ver Figura 15.



Figura 15. Conjunto de manómetros utilizados para adquirir los valores de presión.
Fuente: (Amazon, 2022).

Los manómetros fueron ubicados en los puntos de baja presión y alta presión del compresor para conocer el valor de la presión a la entrada y salida de este en Psi. Para las temperaturas se hizo lo mismo, se ubicaron termocuplas en los puntos más importantes del ciclo: una a la salida del evaporador y a otra a la salida del condensador como a la entrada y salida del compresor en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ver Tabla 15 y 16.

Tabla 15. Valores obtenidos de presión y temperatura durante las pruebas realizadas al compresor Tahoe 2009 con refrigerante R134a.

Nivel	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		Presión (Psi)	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Apagado	12,7	14,5	51	55, 10
Bajo	-7,4	44,4	17,5	150,5
Bajo/medio	-6,3	42,8	18,9	143,7
Medio	-5,8	42,5	19,5	142,5
Medio/alto	-4,4	41,4	21,4	138
Alto	-2,3	40	24,3	132,7

Fuente: (Altamirano, 2020).

Tabla 16. Valores obtenidos de presión y temperatura durante las pruebas realizadas al compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a.

Nivel	Temperatura (°C)		Presión (Psi)	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Apagado	13,1	15,3	52	56,9
Bajo	-13,6	27,9	10,5	90,4
Bajo/medio	-9,8	28,6	14,6	92,6
Medio	-8,8	28,8	15,8	93,2
Medio/alto	-0,8	31,9	26,5	103,3
Alto	0,8	37,5	29	122,9

Fuente: (Altamirano, 2020).

Con los datos de las presiones y las temperaturas se identificaron las entalpías de los refrigerantes en cada uno de los diagramas correspondientes de Mollier o Diagrama P – h durante las diferentes etapas del ciclo, tanto para el refrigerante 134a (Figura 16) como el refrigerante 1234yf (Figura 17). Estos diagramas se presentan en presión vs entalpia, la presión está en bar, mientras que la entalpia se encuentra en kJ/kg, para ambos refrigerantes.

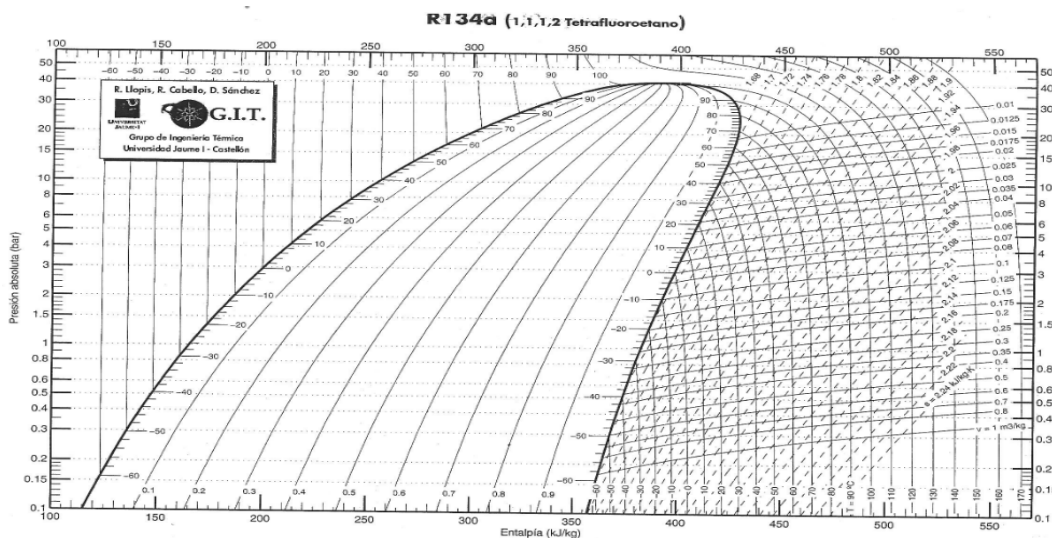


Figura 16. Diagrama de Mollier R134a.

Fuente: (Trusler, 2003).

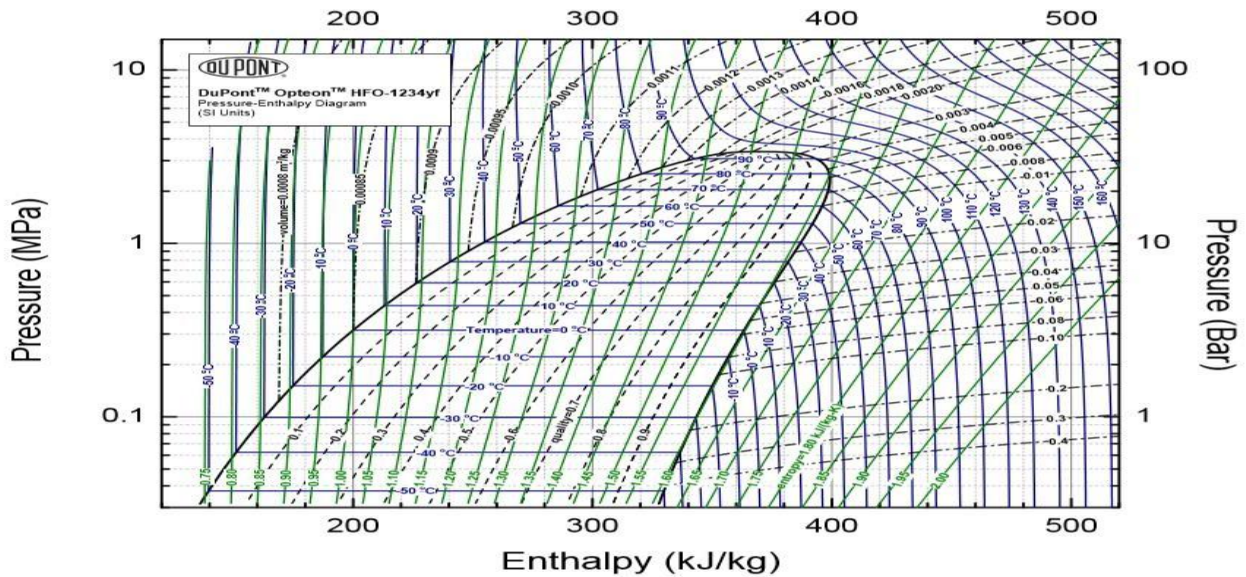


Figura 17. Diagrama de Mollier del refrigerante R134yf.
Fuente: (DuPont, Opteon, & HFO-1234yf, 2009).

Con los datos de las presiones y temperaturas obtenidos en las pruebas realizadas a cada compresor se procedió a reevaluar y ubicar dichos puntos en el diagrama de Mollier para verificar los resultados obtenidos por José Luis Altamirano (Altamirano, 2020).

Se realizaron 5 tipos de prueba, se utiliza un sensor de temperatura (en este caso un termóstato), ya facilita que el sistema trabaje con diferentes presiones, tanto en el circuito de baja, como en el circuito de alta. El termóstato provee cinco niveles: BAJO, BAJO/MEDIO, MEDIO, MEDIO/ALTO y ALTO, estos cinco niveles causan que el compresor se desactive en un tiempo corto o en un tiempo más largo, según sea su nivel.

Para realizar las pruebas de verificación y comparación, se tuvo que probar ambos compresores en el mismo sistema anteriormente expuesto, ver Figura 10. A continuación, se visualizar los resultados obtenidos de estas pruebas realizadas con el compresor Tahoe 2009 con refrigerante R134a durante el funcionamiento del sistema en cada uno de los niveles evaluados, ver Figura 18,19,20,21 y 22.

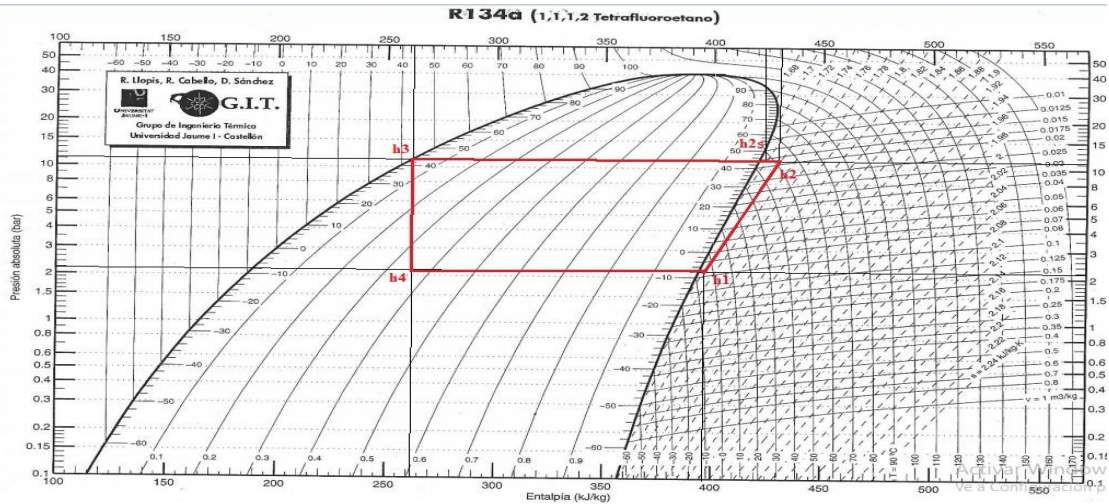


Figura 18. Ciclo Frigorífico, Prueba BAJO.
Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 18, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 17.

Tabla 17. Entalpías del nivel bajo de prueba del compresor Tahoe 2009 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
BAJO	397	432	425	262	262

Fuente: Elaboración propia.

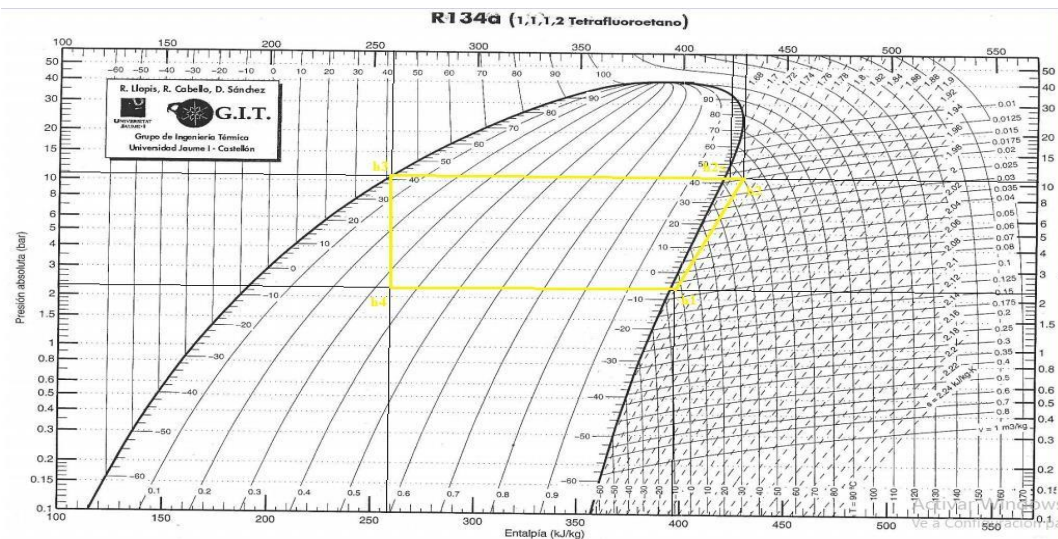


Figura 19. Ciclo Frigorífico, Prueba BAJO/MEDIO.
Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 19, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 18.

Tabla 18. Tabla. Entalpías del nivel Bajo/medio del compresor Tahoe 2009 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
BAJO/MEDIO	399	432	426	261	261

Fuente: Elaboración propia.

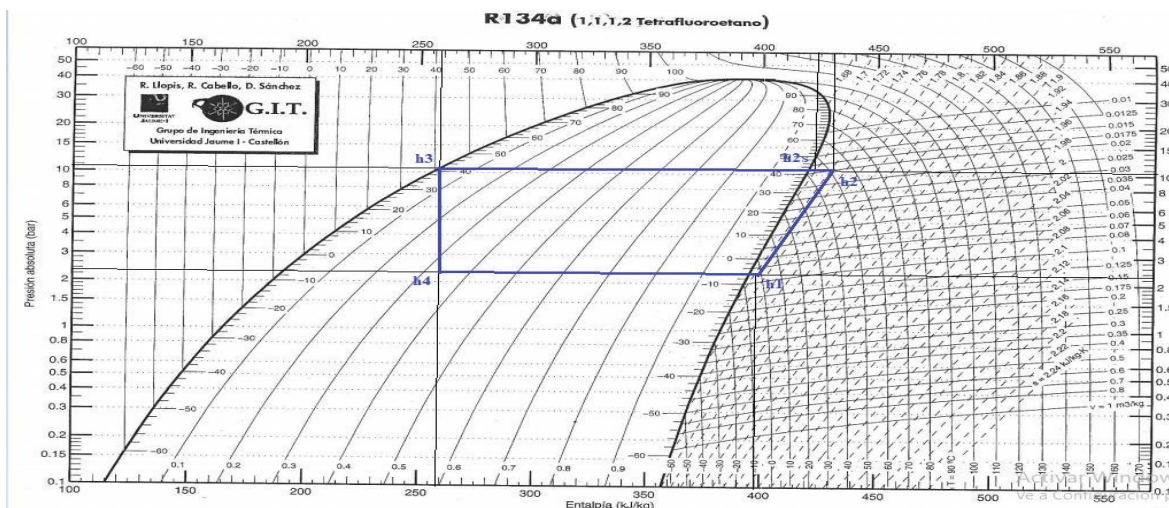


Figura 20. Ciclo Frigorífico, Prueba MEDIO.

Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 20, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 19.

Tabla 19. Entalpías de nivel medio del compresor Tahoe 2009 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
MEDIO	399	432	425	260	260

Fuente: Elaboración propia.

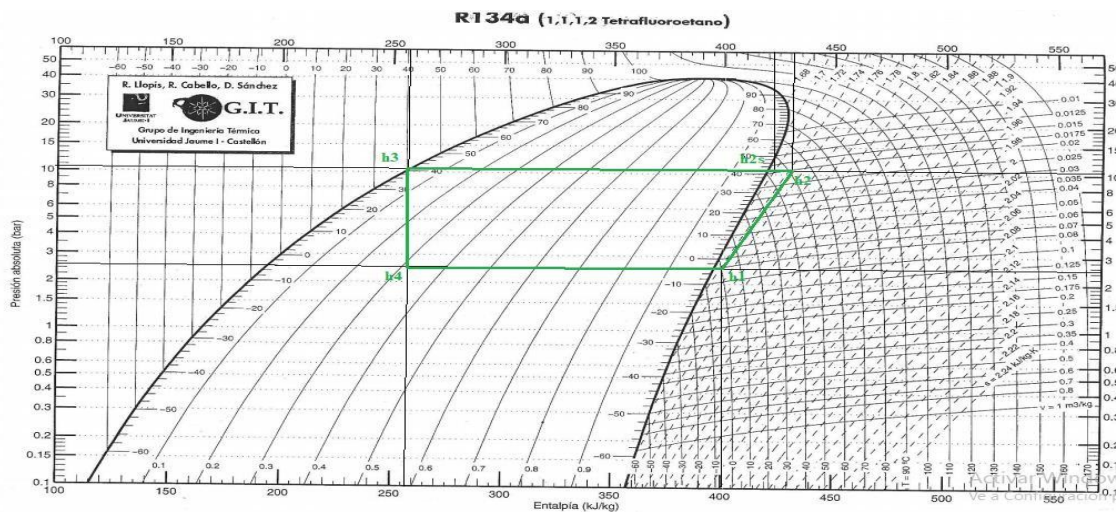


Figura 21. Ciclo Frigorífico, Prueba MEDIO/ALTO.

Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 21, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 20.

Tabla 20. . Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2009 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
MEDIO/ALTO	402	432	424	257	257

Fuente: Elaboración propia.

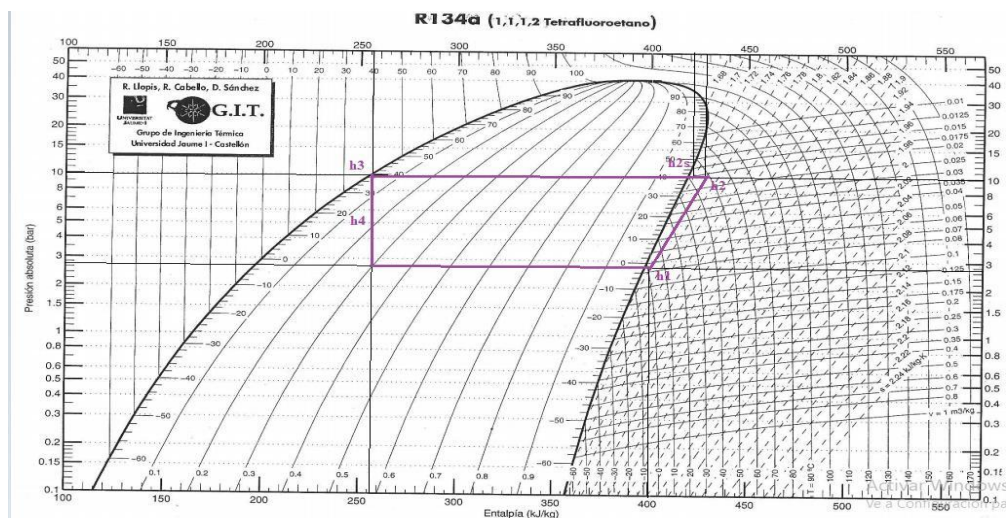


Figura 22. Ciclo Frigorífico, Prueba ALTO.

Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 22, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 20.

Tabla 21. Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2009 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
ALTO	403	430	423	258	258

Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de los resultados de las entalpías en cada uno de los puntos de interés, se siguieron los procedimientos de José Luis Altamirano, pero estos fueron verificados encontrando pequeñas variaciones. Luego con los valores de las entalpías se procedió a calcular la energía específica absorbida o cedida expresada en kJ/kg, la eficiencia del compresor como el trabajo realizado por este, mediante las siguientes ecuaciones (ÇENGEL & BOLES, 2012):

Se procedió a reemplazar los valores de las entalpías encontradas para calcular la eficiencia como la energía liberada durante las pruebas realizadas al compresor Tahoe 2009 con R134a:

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

Para el nivel de prueba bajo:

La eficiencia del compresor se puede calcular con:

$$\eta_c = \frac{425 - 397}{432 - 397} = 0,8$$

El trabajo realizado por el compresor:

$$W_c = 432 - 397 = 35 \text{ kJ/kg}$$

El calor cedido por el condensador:

$$\frac{Q_H^o}{q_c} = 432 - 262 = 170 \text{ kJ/kg}$$

El calor absorbido en el evaporador:

$$\frac{Q_L^o}{q_e} = 397 - 262 = 153 \text{ kJ/kg}$$

COP del evaporador:

$$COP_{evaporador} = \frac{397 - 262}{35} = 3,8571$$

COP del condensador:

$$COP_{condensador} = \frac{432 - 262}{35} = 4,8571$$

Esto se repite con cada uno de los niveles evaluados. En la Tabla 22, se pueden observar los resultados obtenidos utilizando las ecuaciones mencionadas y Excel para la evaluación energética.

Tabla 22. Eficiencia, trabajo del compresor, energía absorbida y cedida por el sistema en cada etapa del ciclo de refrigeración con el compresor Tahoe 2009 y refrigerante R134a.

Nivel	Eficiencia [%]	Trabajo [kJ/kg]	Calor cedido [kJ/kg]	Calor ganado [kJ/kg]	COP/q _c	COP/q _e
BAJO	80.00	35	170	153	4.8571	3.8571
BAJO/MEDIO	81.81	33	171	138	5.1818	4.1818
MEDIO	78,78	33	172	139	5.2121	4.2121
MEDIO/ALTO	73.33	30	175	145	5.8383	4.8383
ALTO	74,07	27	173	146	6.3703	5.3703

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 22, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales de los cinco diferentes niveles. Entre los resultados se obtuvo, la eficiencia o rendimiento del compresor, el trabajo específico interno del compresor, el calor cedido por el condensador, el calor absorbido por el evaporador, el COP del condensador y el COP de refrigeración del evaporador.

Ahora en Tabla 16, se puede observar los valores de presiones y temperaturas de trabajo del compresor Tahoe 2019 con R134a, donde los resultados de presión están en unidades de PSI y los resultados de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), estos valores son otorgados por los manómetros, donde se ubicará los puntos específicos en el Diagrama de Mollier.

A continuación, se visualizar los resultados obtenidos de estas pruebas realizadas con el compresor Tahoe 2019 con refrigerante R134a durante el funcionamiento del sistema en cada uno de los niveles evaluados, ver Figura 23,24,25,26 y 27.

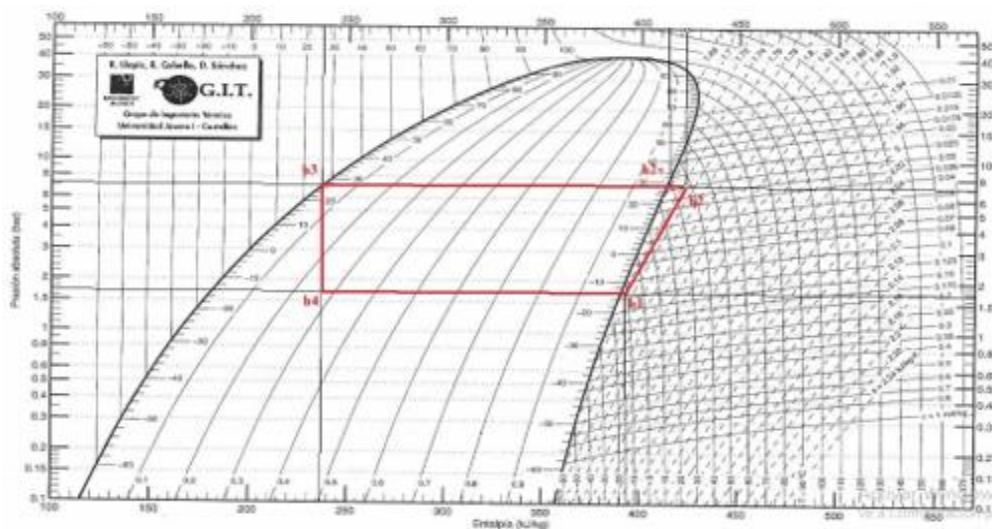


Figura 23. . Ciclo Frigorífico, Prueba BAJO.
Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 23, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 23.

Tabla 23. Entalpías del nivel bajo de prueba del compresor Tahoe 2019 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
BAJO	395	424	415	237	237

Fuente: Elaboración propia.

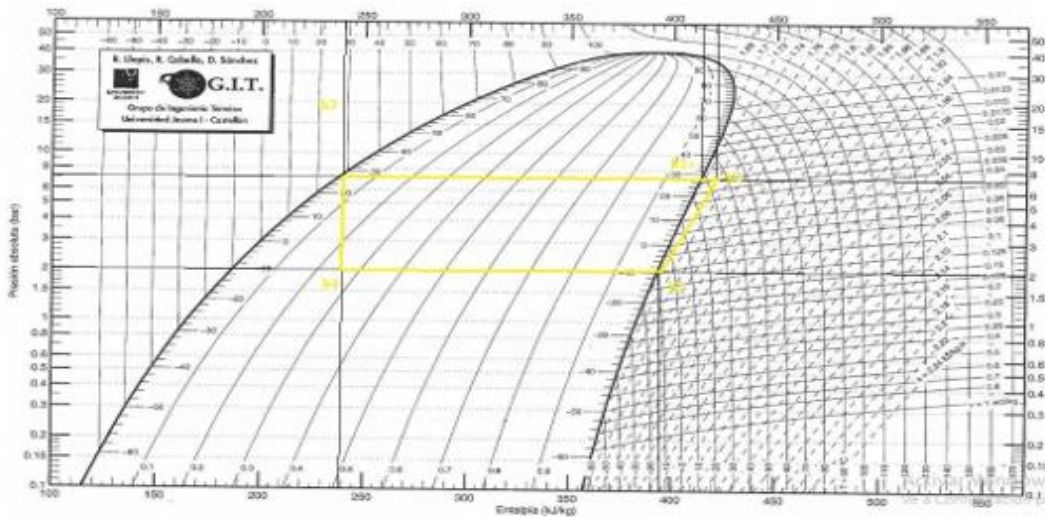


Figura 24. Ciclo Frigorífico, Prueba BAJO/MEDIO.
Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 24, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 24.

Tabla 24. Entalpías del nivel Bajo/medio del compresor Tahoe 2019 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
BAJO/MEDIO	396	422	415	240	240

Fuente: Elaboración propia.

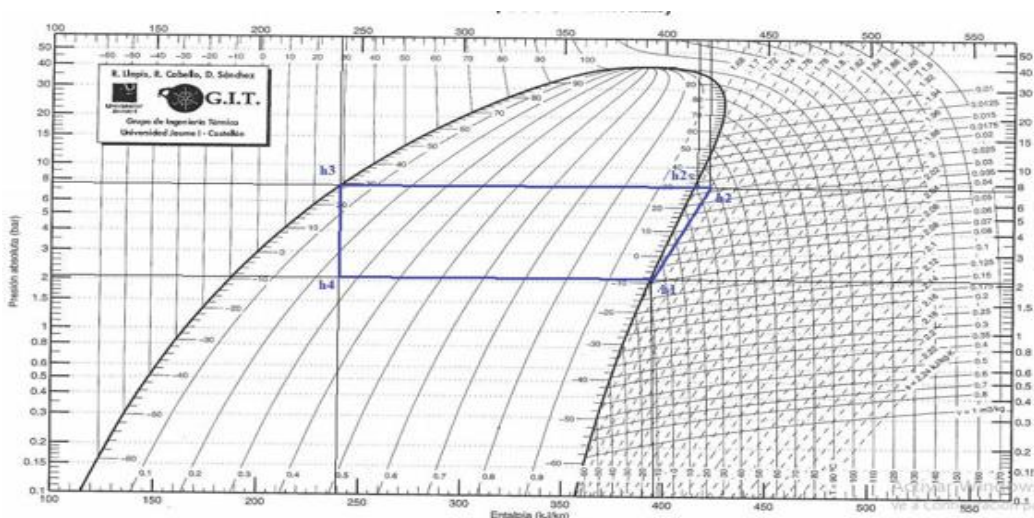


Figura 25. Ciclo Frigorífico, Prueba MEDIO.
Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 25, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 25.

Tabla 25. Entalpías de nivel medio del compresor Tahoe 2019 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
MEDIO	396	423	415	241	241

Fuente: Elaboración propia.

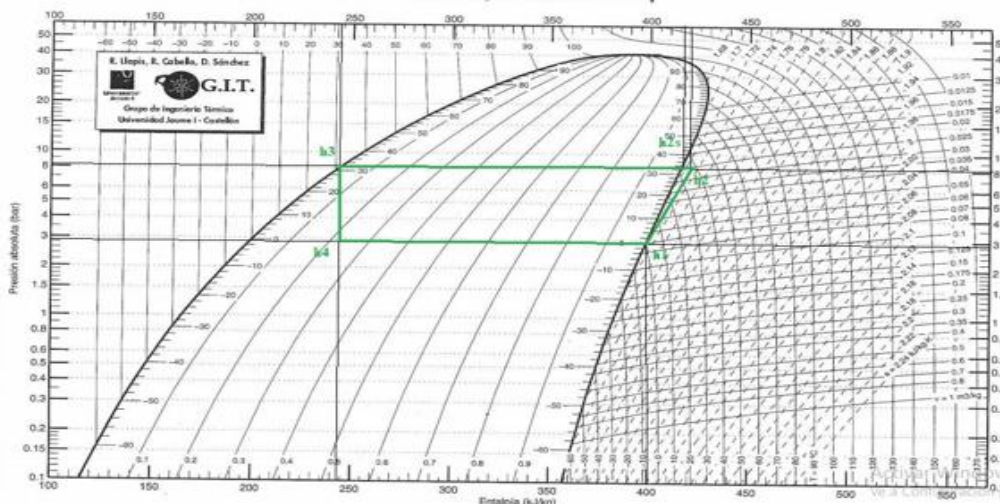


Figura 26. Ciclo Frigorífico, Prueba MEDIO/ALTO.

Fuente: (Altamirano, 2020).

En la Figura 26, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 26.

Tabla 26. Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2019 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
MEDIO/ALTO	402	422	415	247	247

Fuente: Elaboración propia.

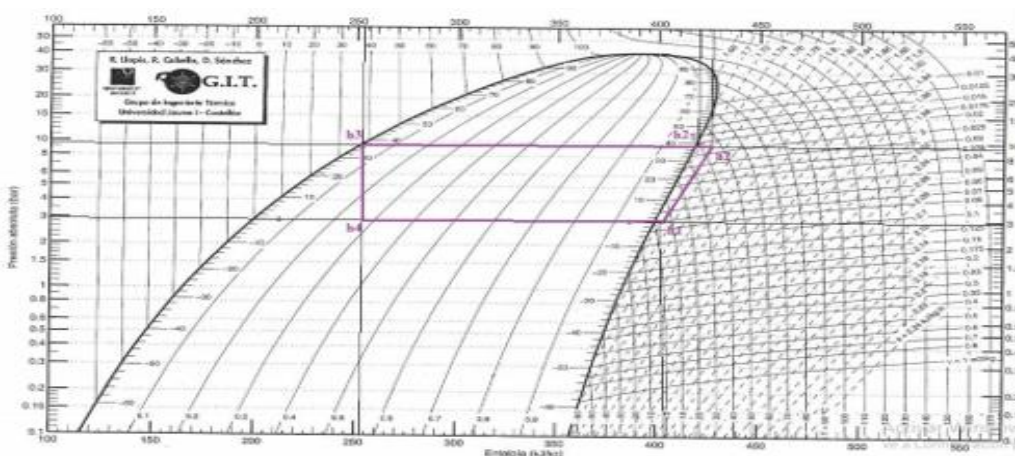


Figura 27. Ciclo Frigorífico, Prueba ALTO.

Fuente: (Altamirano, 2020).

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

En la Figura 27, se puede identificar que los valores de las entalpías en los 5 puntos de interés del diagrama son los siguientes, ver Tabla 27.

Tabla 27. Entalpías del nivel medio/alto del Tahoe 2019 con R134a.

Nivel	h_1 [kJ/kg]	h_2 [kJ/kg]	h_{2s} [kJ/kg]	h_3 [kJ/kg]	h_4 [kJ/kg]
ALTO	406	427	421	256	256

Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de los resultados de las entalpías en cada uno de los puntos de interés, se siguieron los procedimientos de José Luis Altamirano, pero estos fueron verificados encontrando pequeñas variaciones. Luego con los valores de las entalpías se procedió a calcular la energía específica absorbida o cedida expresada en kJ/kg, la eficiencia del compresor como el trabajo realizado por este, mediante las siguientes ecuaciones (ÇENGEL & BOLES, 2012):

Se procedió a reemplazar los valores de las entalpías encontradas para calcular la eficiencia como la energía liberada durante las pruebas realizadas al compresor Tahoe 2019 con R134a:

Para el nivel de prueba bajo:

La eficiencia del compresor se puede calcular con:

$$\eta_c = \frac{415 - 395}{424 - 395} = 0,6896$$

El trabajo realizado por el compresor:

$$W_c = 424 - 395 = 29 \text{ kJ/kg}$$

El calor cedido por el condensador:

$$\frac{Q_H^o}{q_c} = 424 - 237 = 187 \text{ kJ/kg}$$

El calor absorbido en el evaporador:

$$\frac{Q_L^o}{q_e} = 395 - 237 = 158 \text{ kJ/kg}$$

COP del evaporador:

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

$$COP_{evaporador} = \frac{395 - 237}{29} = 5,4482$$

COP del condensador:

$$COP_{condensador} = \frac{424 - 237}{29} = 6,4482$$

Esto se repite con cada uno de los niveles evaluados. En la Tabla 28, se pueden observar los resultados obtenidos utilizando las ecuaciones mencionadas y Excel para la evaluación energética.

Tabla 28. Eficiencia, trabajo del compresor, energía absorbida y cedida por el sistema en cada etapa del ciclo de refrigeración con el compresor Tahoe 2019 y refrigerante R134a.

Nivel	Eficiencia [%]	Trabajo [kJ/kg]	Calor cedido [kJ/kg]	Calor ganado [kJ/kg]	COP/q _c	COP/q _e
BAJO	68.96	29	187	158	6.4482	5.4482
BAJO/MEDIO	73.07	26	182	156	7.00	6.00
MEDIO	70.3707	27	182	155	6.7407	5.7407
MEDIO/ALTO	65	20	175	155	8.75	7.75
ALTO	71.4285	21	171	150	8.1428	7.1428

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 28, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales de los cinco diferentes niveles. Entre los resultados se obtuvo, la eficiencia o rendimiento del compresor, el trabajo específico interno del compresor, el calor cedido por el condensador, el calor absorbido por el evaporador, el COP del condensador y el COP del evaporador.

Con los resultados presentados obtenidos se realizará el análisis comparativo entre ambos compresores.

4.6 Análisis de resultados finales

Ahora es importante recordar que los valores obtenidos en este análisis energético tuvieron como punto de partida los datos obtenidos en las pruebas realizadas por Altamirano debido a la falta de un presupuesto para la creación de un banco de pruebas propio. En este orden de ideas el compresor Tahoe 2019 trabajo con R134a y no con R1234yf que es el refrigerante recomendado por su fabricante para conocer su comportamiento en el sistema y si este trabaja eficientemente como con el R1234yf sin que

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

esté presente inconvenientes en su ciclo frigorífico debido al costo y dificultad de adquisición que presenta el R1234yf.

En la primera parte del análisis se utilizó el compresor Tahoe 2009 con refrigerante R134a, es importante recordar que este solo trabaja con refrigerante R134a y posteriormente el Tahoe 2019 con refrigerante R134a. A poner a prueba el sistema de refrigeración con cada uno de estos compresores, se pudo obtener las presiones y temperaturas de los puntos de interés del ciclo de refrigeración gracias a los manómetros y termocuplas instaladas en el banco de pruebas. Con los valores de estas temperatura y presiones, se procedió a calcular las entalpías en el diagrama de Mollier de cada refrigerante y, por último, se calcularon la eficiencia o rendimiento del compresor, el trabajo específico interno del compresor, el calor cedido por el condensador, el calor absorbido por el evaporador, el COP del condensador y el COP del evaporador, registrados en la Tabla 22 y 28.

Luego en la Tabla 29, se recopiló esta información y se realizó el correspondiente análisis.

Tabla 29. Eficiencias obtenidas durante las pruebas realizadas a los compresores Tahoe 2009 y 2019 con refrigerante R134a.

Nivel	Tahoe 2009 [%]	Tahoe 2019 [%]
BAJO	80.00	68.96
BAJO/MEDIO	81.81	73.07
MEDIO	78,78	70.3707
MEDIO/ALTO	73.33	65
ALTO	74,07	71.4285

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos de la eficiencia del compresor en los 5 niveles de prueba en general evidencian variaciones leves, pero a su vez permiten identificar en que niveles la eficiencia de estos compresores es máxima o mínima. Por ejemplo, la mayor eficiencia del compresor Tahoe 2009 con R134a, está en el nivel BAJO/MEDIO con un 81.81% y la menor eficiencia está en el nivel MEDIO/ALTO con un 73.33 %. Mientras que con el compresor Tahoe 2019 trabajando con R134a su eficiencia máxima se logra en el nivel BAJO/MEDIO con un 73,07 % y la menor eficiencia esta en el nivel MEDIO/ALTO con un 65 %.

Por otra parte, realizando un análisis entre las Tablas 22 y 28 se puede identificar que el trabajo realizado por el compresor Tahoe 2009 es mayor que el realizado por el Tahoe 2019 con el mismo

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

refrigerante R134a. Pero, sin embargo, se puede visualizar también que el calor cedido por el condensador del sistema trabajando con el compresor Tahoe 2019 es mayor que el cedido por el compresor Tahoe 2009. Por último, se observa que los COP del condensador y del evaporador son también mayores para el compresor Tahoe 2019 que el de Tahoe 2009.

Además, Altamirano realizó otra prueba de comprobación diferente a los cálculos realizados en este trabajo con respecto a la eficiencia del sistema, en la cual tomó la temperatura del aire que sale del evaporador comprobando que con el compresor Tahoe 2009 esta es de 2 °C y con el compresor Tahoe 2019 es de 4 °C.

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Para la realización del proyecto fue fundamental la búsqueda bibliográfica realizada en bases de datos, repositorios de tesis, libros e internet mediante la utilización de palabras claves, lo cual permitió conocer todas las características, componentes, ventajas y desventajas de las diferentes mejoras pasivas encontradas en relación con la eficiencia de aires acondicionados automotrices de vehículos livianos.

La creación de una matriz morfológica o de ponderación en el proceso de selección o identificación de la mejora pasiva idónea toma relevancia a la hora de justificar su selección y marca la ruta a seguir por el diseñador o investigador a la hora de evaluar eficiencia Vs costo.

Para el análisis energético realizado a la mejora pasiva indicada por la matriz de ponderación, en esta alternativa 1 y 2 (cambio de compresor Tahoe 2009 por Tahoe 2019), se realizarán cinco pruebas experimentales, donde las presiones y temperaturas varían según la temperatura ambiente y tiempo de trabajo del compresor permitiendo obtener diferentes resultados de eficiencia y COP de rendimiento. Además, este análisis se realizó bajo la premisa de que ambos compresores sean instalados en un mismo sistema de refrigeración y trabajados con el refrigerante 134a aumentando la confianza del resultado obtenido.

Al comparar los resultados de las eficiencias máximas de los compresores Tahoe 2009 que trabaja con R134a y Tahoe 2019 que trabaja con R1234yf, pero en este caso se reemplazó con R134a, tienen una diferencia de 8.74 %, siendo un valor aceptable si se considera que no está trabajando con el refrigerante para el cual fue diseñado.

El agente frigorífico R1234yf comienza a llamar la atención en el campo automotriz, ya que genera menos contaminación. Además, este ya se encuentra presente en la mayoría de los países europeos, pero por motivos comerciales y de legislación no se pudo adquirir en estas partes del mundo justificando que proyectos como este tomen relevancia para su fácil transición al mercado suramericano.

Como sugerencia en base a la investigación realizada, se recomienda realizar otras pruebas con el sistema y el compresor Tahoe 2019 pero trabajando con R1234yf para verificar su eficiencia y posible

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

sustitución a futuro en el sistema de refrigeración automotriz actual debido a sus beneficios energéticos y ambientales.

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

6. REFERENCIAS

- Acedo Zambrana, M. Á. (2012). *Mantenimiento de sistemas de climatización*. Madrid, España: IC Editorial.
- ACI. (2018). *ACI Latinoamerica*. Obtenido de <https://www.acrlatinoamerica.com/201911189066/articulos/otros-enfoques/nuevos-refrigerantes-estamos-realmente-enterados.html>
- Altamirano, J. L. (2020). *Repositorio de la IUSEK*. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3664/1/TESIS%20Evaluaci%C3%B3n%20del%20sistema%20R134a%2C%20utilizando%20un%20compresor%20AC%20automotriz%20tipo%20R1234yf.pdf>
- Angulo, F., & Muñoz, L. (2017). Obtenido de <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/7668/1/65T00247.pdf>
- Asturias, R. A. (01 de 03 de 2021). *Las causas del cambio climático*. Obtenido de <https://www0.asturias.es/portal/site/medioambiente/menuitem.4691a4f57147e2c2553cbf10a6108a0c/?vgnnextoid=1e1c1cc03aa1a110VgnVCM1000006a01a8c0RCRD&i18n.http.lang=es>.
- Benites, C. (2016). <http://repositorio.ute.edu.ec>. Obtenido de <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/14184>
- Benites, C. (julio de 2016). *Repositorio de la Universidad Tecnológica Equinoccial*. Obtenido de <http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/handle/123456789/14184>
- Buque, F. (2007). *Manual Practico de refrigeracion Aire Acondicionado*. Barcelona: Alfaomega.
- ÇENGEL, Y., & BOLES, M. (2012). *TERMODINÁMICA* (Séptima edición ed.). México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Chiva. (4 de Septiembre de 2021). Obtenido de <https://lachivaalerta.com/medellin/en-las-ultimas-dos-decadas-el-parque-automotor-de-medellin-aumento-un-788/>
- Danca, P. (2014). *Experimental and numerical study of the air distribution inside a car cabin*. Bucarest, Rumania.
- DuPont, Opteon, & HFO-1234yf. (2009). Pressure - Enthalpy Diagram. En D. & Opteon, *Pressure - Enthalpy Diagram*.
- Europarl. (18 de abril de 2019). *Noticias parlamento Europeo*. Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras->

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

Trusler, J. (2003). Imperial College London. En J. Trusler, *P - h Diagram for R134a*.

UNAM. (20 de Noviembre de 2007). Obtenido de

<https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf>

Vaghela, J. K. (2016). Comparative evaluation of an automobile air conditioning system using R134a and its alternative refrigerants. (ELSEVIER, Ed.) *Sciencedirect*. Obtenido de www.sciencedirect.com

Villanueva, I. M. (2004). *Refrigerantes para Aire Acondicionado y Refrigeración*. Ecuador: Club Universital.

Universidad EAFIT Contrato CCT 504 DE 2019 Informe Anual de Calidad del Aire (2019) Obtenido de

<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del->

[aire/informes_red_calidaddeaire/Informe%20Anual%20Aire/202019.pdf](https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/informes_red_calidaddeaire/Informe%20Anual%20Aire/202019.pdf)

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

7. ANEXOS

Anexo A. Firma del documento.

FIRMA ESTUDIANTES:

Juan Camilo Vásquez O.

JUAN CAMILO VÁSQUEZ O

FIRMA ASESORES:

Adrián F. Martínez

ADRIÁN FELIPE MARTÍNEZ

FECHA ENTREGA: 15/11/2022