

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



### **Tesis**

**Análisis Termodinámico de evaluación de la factibilidad de  
utilizar Bombas de Calor para aumentar la Autonomía de un  
Vehículo Eléctrico**

**Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico**

Elaborado por

Roberto Jesus Andres Alicedo Ramirez

 [0000-0003-3660-8520](https://orcid.org/0000-0003-3660-8520)

Asesor

Msc. Fausto Godofredo Valdivia

 [0000-0003-1494-9690](https://orcid.org/0000-0003-1494-9690)

**LIMA – PERÚ**

**2025**

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Citar/How to cite              | (Alicedo, 2025)                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Referencia/Reference           | Alicedo, R. (2025). <i>Análisis Termodinámico de evaluación de la factibilidad de utilizar Bombas de Calor para aumentar la Autonomía de un Vehículo Eléctrico</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style:<br>APA (7ma ed.) |                                                                                                                                                                                                                                                                         |

### ***Dedicatoria***

*Dedico el presente trabajo de investigación  
a mis padres, por siempre apoyarme a  
cumplir mis objetivos y a Dios, por las  
oportunidades brindadas en la vida.*

## Resumen

El rango de operación óptimo de la batería de un vehículo eléctrico está limitado por factores externos como la temperatura del medio ambiente. La disminución de la temperatura afecta directamente a los conductores en su capacidad de movilizarse, debido a que no hay un sistema que limite la disminución de la temperatura de la batería.

El propósito del trabajo de investigación comprende el análisis termodinámico para evaluar la factibilidad de utilizar un sistema de bomba de calor aplicada a un vehículo eléctrico, analizando la eficiencia del sistema a diferentes temperaturas de trabajo, con el objetivo de mejorar el rango de recorrido del vehículo eléctrico.

La temperatura del medio ambiente se define como un punto inicial del análisis, así como el rango de temperaturas que estará trabajando el refrigerante para elaborar un diagrama T - s (temperatura – entropía específica). Se evaluó la eficiencia del sistema en diferentes temperaturas de trabajo, aplicando conceptos termodinámicos y de transferencia de calor, se determinó el flujo de masa del refrigerante y el aumento del rango de recorrido del vehículo.

El sistema se evaluó con diferentes números de bombas de calor. Los resultados muestran que el tiempo necesario para calentar la temperatura de la batería de 0°C a 15°C varía de 689.07 minutos, en el caso se utilice una bomba de calor, a 172.68 minutos, en el caso se utilicen cuatro bombas de calor. Se estima que a 15°C el rango de recorrido disminuiría a 14.5% de la capacidad original.

Palabras clave: termodinámica, vehículos eléctricos, bomba de calor, consumo energético.

## **Abstract**

The optimal operating range of an electric vehicle battery is limited by external factors such as ambient temperature. The decrease in temperature directly affects drivers' ability to move around, since there is no system that limits the decrease in battery temperature.

The purpose of this research is to perform a thermodynamic analysis to evaluate the feasibility of using a heat pump system in an electric vehicle, analyzing the system's efficiency at different operating temperatures, with the goal of improving the electric vehicle's range.

The ambient temperature is defined as a starting point for the analysis, as well as the temperature range that the coolant will be working at to create a T - s diagram (temperature - specific entropy). The efficiency of the system was evaluated at different working temperatures, applying thermodynamic and heat transfer concepts, the mass flow of the coolant and the increase in the vehicle's travel range were determined.

The system was evaluated with different numbers of heat pumps. The results show that the time required to heat the battery temperature from 0°C to 15°C varies from 689.07 minutes, in the case of using one heat pump, to 172.68 minutes, in the case of using four heat pumps. It is estimated that at 15°C the travel range would decrease to 14.5% of the original capacity.

Keywords: thermodynamics, electric vehicles, heat pump, energy consumption.

## Tabla de Contenido

|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| Resumen .....                                                       | iv   |
| Abstract .....                                                      | v    |
| Tabla de Contenido .....                                            | vi   |
| Lista de Tablas .....                                               | viii |
| Lista de Figuras .....                                              | ix   |
| Introducción .....                                                  | xi   |
| CAPÍTULO I. Generalidades .....                                     | 1    |
| 1.1. Antecedentes de la Investigación .....                         | 1    |
| 1.2 Identificación y Descripción del Problema de Investigación..... | 9    |
| 1.3. Formulación del problema. ....                                 | 14   |
| 1.3.1. Problema Principal.....                                      | 14   |
| 1.3.2. Problemas específicos.....                                   | 14   |
| 1.4. Justificación e Importancia.....                               | 14   |
| 1.5 Objetivos.....                                                  | 17   |
| 1.5.1 Objetivo General.....                                         | 17   |
| 1.5.2 Objetivos Específicos.....                                    | 17   |
| 1.6. Hipótesis .....                                                | 17   |
| 1.6.1. Hipótesis General .....                                      | 17   |
| 1.6.2. Hipótesis Específicas.....                                   | 17   |
| 1.7. Variables y Operacionalización de variables. ....              | 18   |
| 1.7.1. Operacionalización de variables. ....                        | 18   |
| 1.8. Metodología de la Investigación .....                          | 18   |
| 1.8.1. Unidades de Análisis. ....                                   | 18   |
| 1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación. ....                 | 19   |
| 1.8.3. Diseño de la Investigación. ....                             | 19   |
| 1.8.4. Fuentes de Información. ....                                 | 20   |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.8.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos. ....                                | 20 |
| CAPÍTULO II. Marco Teórico y Marco Conceptual.....                                          | 22 |
| 2.1 Bases Teóricas. ....                                                                    | 22 |
| 2.1.1 Vehículo eléctrico.....                                                               | 22 |
| 2.1.2 Tipos de baterías .....                                                               | 23 |
| 2.1.3 Comportamiento termodinámico de la batería de iones de litio .....                    | 25 |
| 2.1.3.1 Impacto negativo de la temperatura sobre las baterías .....                         | 26 |
| 2.1.4 Ciclo de Carnot .....                                                                 | 27 |
| 2.1.5 Bombas de calor .....                                                                 | 28 |
| 2.1.6 Eficiencia de la bomba de calor .....                                                 | 30 |
| 2.1.7 Transferencia de calor .....                                                          | 31 |
| 2.1.8 Transferencia de calor por conducción .....                                           | 31 |
| 2.1.9 Transferencia de calor por convección .....                                           | 32 |
| 2.1.10 Transferencia de calor por radiación.....                                            | 34 |
| 2.2 Marco Conceptual.....                                                                   | 35 |
| CAPÍTULO III. Desarrollo del Trabajo de Investigación .....                                 | 36 |
| CAPÍTULO IV. Resultados, Contratación de Hipótesis y Discusión Resultados57                 |    |
| 4.1 Análisis de los resultados obtenidos respecto con la temperatura de la batería<br>..... | 57 |
| 4.2 Contrastación de hipótesis.....                                                         | 65 |
| Conclusiones.....                                                                           | 66 |
| Recomendaciones.....                                                                        | 68 |
| Referencias .....                                                                           | 69 |

## Lista de Tablas

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Operacionalización de variables.....                                            | 18 |
| Tabla 2: Características termodinámicas del punto 1.....                                 | 38 |
| Tabla 3: Características termodinámicas del punto 2.....                                 | 39 |
| Tabla 4: Características termodinámicas del punto 2' .....                               | 40 |
| Tabla 5: Características termodinámicas del punto 2'' .....                              | 41 |
| Tabla 6: Características termodinámicas del punto 3 .....                                | 42 |
| Tabla 7: Características termodinámicas del punto 4 .....                                | 43 |
| Tabla 8: Propiedades termodinámicas del R134a a 30°C .....                               | 46 |
| Tabla 9: Tabla resumen .....                                                             | 56 |
| Tabla 10: Tabla resumen para los sistemas con diferentes números de bomba de calor ..... | 58 |
| Tabla 11: Rango de autonomía a diferentes temperaturas de la batería .....               | 64 |



## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Árboles requeridos para absorber el CO <sub>2</sub> emitido por un vehículo no eléctrico según estudio .....                                 | 9  |
| Figura 2: Reducción porcentual de la autonomía de diferentes vehículos a bajas temperaturas .....                                                      | 10 |
| Figura 3: Factores para decidir sobre la compra de un coche .....                                                                                      | 11 |
| Figura 4: Comparativa de las características entre un vehículo MHEV, HEV, PHEV y BEV .....                                                             | 13 |
| Figura 5: Comparación entre los costes de un vehículo eléctrico, diésel y gasolina en Barcelona .....                                                  | 15 |
| Figura 6: Percepción de los consumidores respecto a los motores de diferentes tipos de vehículos .....                                                 | 16 |
| Figura 7: Representación de los trenes de potencia de un PHEV (derecha), un EV (centro) y un EV with RE (izquierda) mediante diagrama de bloques ..... | 23 |
| Figura 8: Comparación entre los diferentes tipos de baterías .....                                                                                     | 24 |
| Figura 9: Comparación de la densidad de energía volumétrica (eje y) y densidad de energía específica (eje x) de cuatro tipos de baterías .....         | 25 |
| Figura 10: Componentes de una celda de iones de litio (izquierda) y flujo de trabajo (derecha) .....                                                   | 26 |
| Figura 11: Capacidad de la batería en función de la temperatura .....                                                                                  | 27 |
| Figura 12: Diagrama PV del Ciclo de Carnot .....                                                                                                       | 28 |
| Figura 13: Ciclo termodinámico de una bomba de calor .....                                                                                             | 29 |
| Figura 14: Diagrama ideal (izquierda) y diagrama real (derecha) de un ciclo de compresión .....                                                        | 31 |
| Figura 15: Análisis de la conducción de calor unidimensional en un cuerpo .....                                                                        | 32 |
| Figura 16: Ejemplo de transferencia de calor por convección a través de una placa .....                                                                | 33 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 17: Diagrama T - s del refrigerante R134a .....                         | 37 |
| Figura 18: Ubicación del punto 1 en el diagrama T - s .....                    | 38 |
| Figura 19: Ubicación del punto 2 en el diagrama T - s .....                    | 39 |
| Figura 20: Ubicación del punto 2' en el diagrama T - s .....                   | 41 |
| Figura 21: Ubicación del punto 2'' en el diagrama T - s .....                  | 42 |
| Figura 22: Ubicación del punto 3 en el diagrama T - s .....                    | 43 |
| Figura 23: Ubicación del punto 4 en el diagrama T - s .....                    | 44 |
| Figura 24: Representación del diagrama T - s del sistema de bomba de calor.... | 44 |
| Figura 25: Diagrama de resistencias .....                                      | 48 |
| Figura 26: Diagrama de la ubicación del sistema con una bomba de calor .....   | 59 |
| Figura 27: Diagrama de la ubicación del sistema con dos bombas de calor .....  | 59 |
| Figura 28: Diagrama de la ubicación del sistema con tres bombas de calor ..... | 60 |
| Figura 29: Diagrama de la ubicación del sistema con cuatro bombas de calor ... | 60 |
| Figura 30: Gráfica Temperatura de la batería vs Tiempo de carga .....          | 61 |
| Figura 31: Gráfica Temperatura de la batería vs Flujo de calor .....           | 62 |
| Figura 32: Gráfica Temperatura de la batería vs Flujo de masa .....            | 63 |

## Introducción

La tesis comprende el estudio termodinámico de un sistema de bomba de calor en un vehículo eléctrico, para mejorar el rango de recorrido en condiciones de temperaturas bajas.

La investigación para cumplir dicho objetivo se desarrolló de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta las generalidades, conformada por la problemática de la disminución del rango de recorrido de la batería de un vehículo eléctrico en condiciones de baja temperatura, por lo cual se definen los objetivos de la investigación y se mencionan investigaciones anteriores relacionadas al tema en el apartado de antecedentes investigativos. Además, se presenta el planteamiento de la hipótesis, con sus variables e indicadores, así como la operacionalización de variables.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico, donde se describe los conceptos del vehículo eléctrico, los tipos de batería para vehículos eléctricos, el funcionamiento de la bomba de calor y sus componentes, la parte teórica de los fundamentos termodinámicos y transferencia de calor y masa. Luego, en el marco conceptual, se define los significados de términos empleados en la investigación.

En el tercer capítulo se describe la metodología considerada para la investigación, los datos considerados, el rango de temperaturas para evaluar el sistema, el desarrollo de los cálculos y las gráficas del diagrama  $T - s$ .

En el cuarto capítulo, se presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos luego de elaborar las gráficas en el capítulo anterior, para determinar cuál es el caso óptimo según las necesidades del usuario. Adicionalmente, se presentan tablas y gráficos comparativos a diferentes temperaturas de trabajo.

Finalmente, para culminar la investigación, se presentan las conclusiones y las recomendaciones, además de las referencias bibliográficas y anexos.

# **CAPÍTULO I. Generalidades**

## **1.1. Antecedentes de la Investigación**

Jin (2020)<sup>1</sup> investigó las causas por las que una persona no compraría un vehículo eléctrico. El objetivo fue explicar acerca de la situación del mercado de coches eléctricos en el año 2020. La metodología desarrollada en la investigación presenta una recolección de datos a través de encuestas, lo que permitió obtener una comprensión más detallada acerca de los factores que impiden la compra de vehículos eléctricos. Uno de los principales problemas identificados en la investigación está relacionado a la batería, la cual experimenta diferentes niveles de comportamiento debido a la temperatura, estilo de manejo, entre otros. La investigación posee un nivel explicativo, plantea una interrogante sobre la principal causa de no comprar un vehículo eléctrico y pretende entender la tendencia a futuro en el mercado automotor. Por ejemplo, la investigación permitió conocer la perspectiva de los consumidores respecto de las deficiencias que perciben del vehículo eléctrico, entre los cuales se encuentra la batería y la falta de estaciones de recarga. Finalmente, el autor concluyó que los usuarios no están a favor de comprar los coches eléctricos a corto plazo principalmente por los problemas relacionados a la batería, como el limitado rango de recorrido y el alto precio comparado con un coche de combustión interna.

---

<sup>1</sup> Jin, C (2020). Coche eléctrico y la batería: situación actual de mercado y su modelo de operación comercial [Tesis, Universitat Autònoma de Barcelona].

Jung (2020)<sup>2</sup> investigó la relación entre la masa y los parámetros de rendimiento para los vehículos híbridos enchufables y eléctricos híbridos, como el rango de conducción y la economía del combustible en el primer tipo de vehículo, o como la temperatura del medio ambiente afecta a ambos vehículos. La metodología desarrollada en la investigación recopila información de 65 vehículos ligeros de 15 fabricantes entre el 2018 y 2019 en Estados Unidos, para la investigación del rango de recorrido y economía del combustible. En el caso del efecto de la temperatura del medio ambiente en la economía de combustible y la recuperación de energía cinética a través del frenado, se trabajó con información de ocho vehículos entre el 2013 y 2015. La investigación posee un nivel explicativo, plantea interrogantes sobre diferentes problemas que afectan los vehículos híbridos enchufables y eléctricos híbridos, como el efecto de la temperatura del medio ambiente, se estima una reducción promedio del 25% de la economía del combustible, en condición de verano, y una reducción del 50% aproximadamente en condición de invierno. Finalmente, el autor concluyó que ambos tipos de vehículos son fundamentales para reducir las emisiones que afectan al cambio climático, por lo cual se debe seguir mejorando la eficiencia de combustible y recuperación de energía para maximizar los beneficios de estos vehículos.

---

<sup>2</sup> Jung, H (2020). Fuel Economy of Plug-In Hybrid Electric and Hybrid Electric Vehicles: Effects of Vehicle Weight, Hybridization Ratio and Ambient Temperature. [Artículo, World Electric Vehicle Journal].

Steinstraeter et al (2021)<sup>3</sup> investigaron las causas de la disminución significativa en la autonomía de los vehículos eléctricos. El objetivo fue analizar el impacto de las bajas temperaturas en la autonomía de estos vehículos. La investigación analiza los datos de conducción registrados con un BMW i3 (2014) y un Tesla Model 3 (2020) en la ciudad de Múnich. Los datos incluyen la velocidad del vehículo, temperatura de la batería, corriente de la batería, entre otros. Esta es una investigación de nivel explicativo, plantea interrogantes sobre como las bajas temperaturas afectan la autonomía de los vehículos eléctricos de batería y cuáles son los factores específicos que contribuyen a esta disminución. Se registra una disminución de aproximadamente 30% cuando se usa energía para calefacción. Los autores concluyeron que las temperaturas tienen un impacto significativo en la autonomía de los vehículos eléctricos, por lo cual, la implementación de un sistema de recuperación electrotermal podría ser una solución efectiva para reducir este impacto.

---

<sup>3</sup> Steinstraeter, M. et al. (2021). Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range. [Artículo, World Electric Vehicle Journal].

Szumska et al (2021)<sup>4</sup> investigaron las causas por las que potenciales compradores de vehículos eléctricos desestiman su compra. El objetivo fue determinar el efecto de diversos parámetros en la descarga de la batería de un vehículo eléctrico. La investigación analiza los efectos del ciclo de conducción, temperatura del medio ambiente, la carga y el estado inicial de carga del acumulador en el patrón de consumo de energía y la descarga de la batería. La investigación posee un nivel explicativo, plantea una interrogante sobre como los diferentes factores operativos afectan el alcance de un vehículo eléctrico. Los hallazgos muestran que las condiciones operativas del vehículo tienen un impacto significativo en la vida útil de la energía. Finalmente, los autores concluyeron que es crucial conocer los factores que pueden reducir el rango de recorrido durante el uso diario.

---

<sup>4</sup> Szumska, E. et al (2021). Parameters Influencing on Electric Vehicle Range. [Artículo, Energies].

Ye et al (2024)<sup>5</sup> investigaron las causas de la disminución del rendimiento de las baterías de litio en vehículos eléctricos. El objetivo fue desarrollar una estrategia de control para el precalentamiento rápido de las baterías a bajas temperaturas. La metodología desarrollada en la investigación propone el uso de sistema de precalentamiento rápido que utiliza un circuito líquido independiente equipo con un calentador de alto voltaje. Este sistema logra un tiempo de precalentamiento de 2000 segundos para una batería de litio ternaria con una capacidad de 73kWh y un voltaje nominal de 770V. La investigación posee un nivel explicativo, ya que busca explicar las causas y efectos de la degradación de las baterías a bajas temperaturas y propone soluciones para mitigar estos efectos. Se plantean interrogantes de cómo mejorar la eficiencia del calentamiento de las baterías y como evitar la carga y descarga incontroladas. Los autores concluyeron que el uso de un circuito de refrigerante independiente con un calentador de alto voltaje puede mejorar la eficiencia del calentamiento en el sistema de gestión térmica de la batería.

---

<sup>5</sup> Ye, Z. et al (2024). Research on control strategy of rapid preheating for power battery in electric vehicle at low temperatures. [Artículo, Applied Thermal Engineering].



Ali et al (2024)<sup>6</sup> investigaron los problemas en la fiabilidad de las baterías de litio en vehículos eléctricos. El objetivo fue analizar los indicadores de fiabilidad, como la degradación de la capacidad y degradación de la potencia, bajo diferentes condiciones ambientales y tasas de descarga. La metodología desarrollada en la investigación presenta un análisis cualitativo. Se utilizaron tres escenarios de degradación para investigar la influencia de las temperaturas y tasas de descarga en los indicadores de fiabilidad. Por ejemplo, se analizaron las baterías bajo diferentes temperaturas ambientales (10°C, 25°C y 45°C) y condiciones estándar de carga (0.5C) y descarga (0.2C). La investigación posee un nivel explicativo, ya que busca entender las causas y efectos de la degradación de las baterías de iones de litio. Plantea interrogantes sobre cómo las diferentes condiciones de degradación afectan la fiabilidad de las baterías y cuáles son los indicadores más críticos para evaluar su rendimiento. Los autores concluyen que la degradación de la capacidad y la degradación de la potencia son impactos críticos de la degradación de las baterías de iones de litio que deben investigarse para satisfacer los requisitos de fiabilidad.

---

<sup>6</sup> Ali, Z. et al (2024). Review of batteries reliability in electric vehicle and E-mobility applications. [Artículo, Ain Shams Engineering Journal].

Alvarez et al. (2022)<sup>7</sup> investigaron un modelo óptimo de gestión y operación de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos en la ciudad de Lima. La metodología desarrollada en la investigación para la estimación de la demanda de los servicios de carga considera la proyección de la demanda de vehículos eléctricos a 10 años, lo que ha permitido estimar la cantidad de cargadores de vehículos eléctricos del tipo 2x11kW que se necesitarán. La investigación propone un plan de acción para la implementación de la infraestructura de carga, mediante la estructuración de una Alianza Pública Privada, lo que permitiría al Estado brindar una mejor condición para impulsar la venta de vehículos eléctricos. Los autores concluyeron que es de importancia la implementación de una infraestructura de carga en la transición hacia una movilidad más sostenible en la ciudad de Lima, y la necesidad de promover políticas de incentivos y estrategias para la masificación del vehículo eléctrico en la región, lo que contribuirá a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

---

<sup>7</sup> Alvarez, R. et al (2022). Despliegue de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos particulares. [Tesis de Maestría, ESAN].

Cuno (2020)<sup>8</sup> investigó la conversión de vehículos convencionales a eléctricos. El objetivo fue analizar si en la región de Arequipa es posible realizar la conversión de un motor de combustión interna a un motor eléctrico de un vehículo. La metodología desarrollada en la investigación presenta pruebas experimentales, debido a que se utilizan vehículos con motor de combustión interna, para luego realizar un cambio de motor a uno eléctrico, y se sustenta con los cálculos desarrollados. En la investigación se incluye un análisis económico para estimar el ahorro para el usuario de hacer la conversión de un vehículo tradicional a uno eléctrico. La investigación posee un nivel explicativo, describe detalladamente el procedimiento de conversión, e incluye un impacto ambiental, por lo que permite estimar la reducción de emisiones de gases de efectos invernaderos. Por ejemplo, la investigación permitió estimar cuántos kilogramos de CO<sub>2</sub> se dejarían de producir en un futuro en la ciudad de Arequipa gracias a la conversión de los vehículos que son aptos para esto. El autor concluyó que la conversión de vehículos con motor de combustión interna a motor eléctrico es factible, ya sea en el apartado técnico como económico, con una reducción en la cantidad de contaminantes de aproximadamente 40%, en millones de toneladas/día de CO<sub>2</sub>, por lo que se dejaría de emitir 368 millones de CO<sub>2</sub> como gas de efecto invernadero.

---

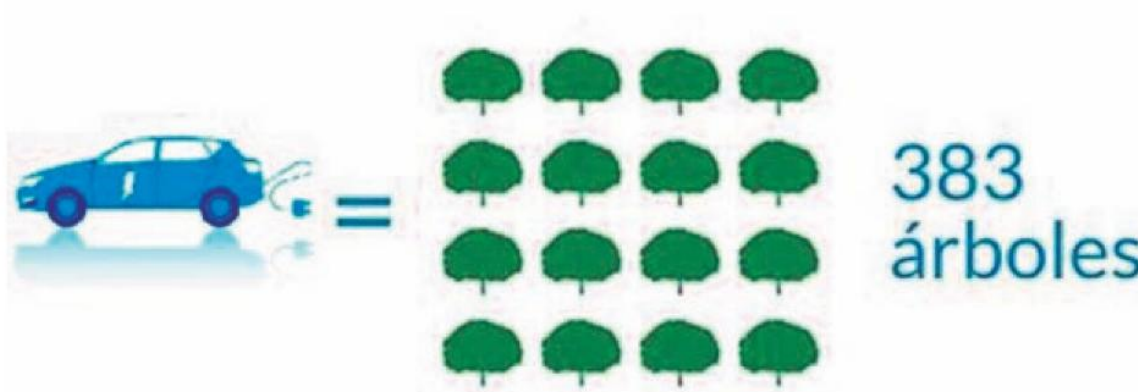
<sup>8</sup> Cuno, D. (2020). Factibilidad técnica y económica para la conversión de vehículos en la región Arequipa, consideraciones para la normalización de la movilidad eléctrica [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].

## 1.2 Identificación y Descripción del Problema de Investigación

El vehículo de combustión interna requiere la quema de combustible para desplazarse, lo cual contamina el medio ambiente a comparación del vehículo eléctrico. Además, la eficiencia térmica de los motores de combustión interna resulta inferior comparado con un motor eléctrico, por lo cual no se aprovecha toda la capacidad de la energía del combustible. Sin embargo, cuando la temperatura del medio ambiente disminuye en invierno, la batería del vehículo eléctrico reduce su capacidad de recorrido. Como se presenta en la figura 1, según un estudio de la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2015), la cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que no se emite con el uso del vehículo eléctrico es de 352 kg, equivale al  $\text{CO}_2$  que absorberían 383 árboles. (pág. 34)

**Figura 1**

*Árboles requeridos para absorber el  $\text{CO}_2$  emitido por un vehículo no eléctrico según estudio.*



Nota. Fuente: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2015) pág. 34. "Guía del Vehículo Eléctrico II"

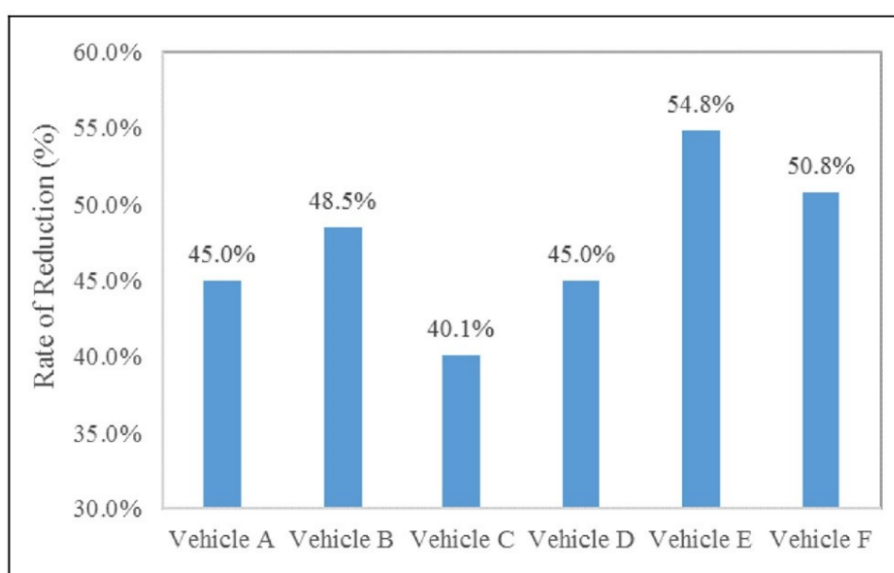
El medio ambiente por el cual se desplaza el vehículo influye en el rango de recorrido de la batería, si la temperatura es menor o mayor que la temperatura óptima, se reduce el rango de recorrido. Una menor capacidad en el desplazamiento del vehículo

eléctrico incrementa el tiempo de recarga de la batería, o aumenta el número de paradas que el usuario debe realizar para recargar el vehículo y llegar a su destino.

Según Zhao et al. (2022) en un estudio realizado a seis vehículos de tres fabricantes diferentes, se consideró una temperatura ambiente inicial de 25 °C en una primera etapa, para luego volver a realizar el estudio a una temperatura de -7°C. La distancia de recorrido disminuyó drásticamente a bajas temperaturas, y según la gráfica que se presenta en la figura 2, la tasa media de reducción fue superior al 40% en los seis vehículos considerados en la investigación. (pág. 2)

**Figura 2**

*Reducción porcentual de la autonomía de diferentes vehículos a bajas temperaturas*

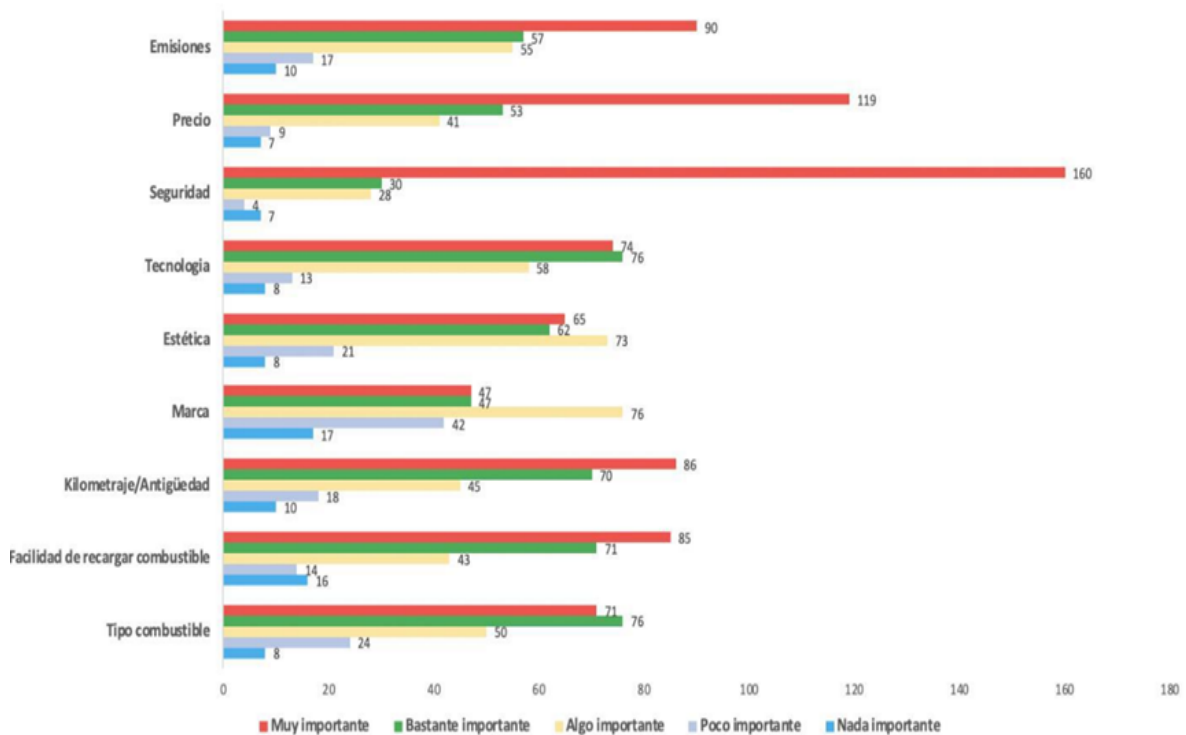


Nota. Fuente: Zhao, C., et al (2022) pág. 2. "Research on electric vehicle range under cold condition"

Según Jin (2020) el rango de recorrido de un vehículo eléctrico es menor al de un vehículo con motor de combustión interna y el tiempo para recargar la batería es mayor en comparación con el combustible. A sus desventajas del vehículo eléctrico, se añade el alto costo de adquisición, la posibilidad de explosión de la batería, y el alto precio, los cuales son factores para decidir sobre la compra de un vehículo, como se presenta en la figura 3. (pág. 16)

**Figura 3**

*Factores para decidir sobre la compra de un coche*



Nota. Fuente: Jin,C (2020) pág. 17. “Coche eléctrico y la batería: situación actual del mercado y su modelo de operación comercial”

Según Barros et al. (2018) existen diferentes tipos de batería para los vehículos eléctricos. Entre los diversos modelos, la batería de níquel – hidrúlico metálico, a temperaturas elevadas, presenta los problemas de deterioro por el material, y tiene un ciclo limitado de recargas. En el caso de las baterías de ion – litio, el valor de la energía específica es mayor en comparación con otros tipos de batería, sin embargo, las desventajas que presentan son un alto costo de producción, fragilidad y el peligro de explotar por el sobrecalentamiento. (pág. 10)

Según la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2015) para recargar la batería de un vehículo eléctrico, se requiere de una infraestructura exclusiva para los vehículos eléctricos. A diferencia de las estaciones de gasolina para vehículos de motores de combustión interna, donde el tiempo de recarga es menor a cinco minutos en general,

los vehículos eléctricos se conectan a postes en superficie, donde el tiempo de recarga es mayor, hasta 30 minutos para recargar completamente la batería. (pág. 81)

Por lo cual, en invierno, el número de paradas para recargar la batería aumentaría si el rango de autonomía disminuye, y la recarga de un vehículo eléctrico de batería (BEV) también influye en el consumo energético de una ciudad.

“El BEV impacta a la red eléctrica puesto que la energía de las baterías es recargada de la red. De esta manera, la red debe ser capaz de suministrar la energía y potencia demandada de todos los BEV existentes en el mercado”. (Garcia Ruiz, 2015, pág. 57)

Según Isla et al. (2019) las empresas involucradas en la fabricación y venta de vehículos eléctricos buscan el desarrollo de las baterías para incrementar el rango de recorrido de los vehículos, la disminución del tiempo de recarga, y el establecimiento de una infraestructura de carga, sobre todo pública. (pág. 29)

“El gran desafío en el desarrollo de estos vehículos es la fabricación masiva de baterías recargables con alto nivel de rango y autonomía.” (Isla, Singla, Rodríguez Porcel, & Granda, 2019, pág. 19)

En la figura 4 se presenta la comparación entre diferentes tipos de vehículos eléctricos, como el vehículo microhíbrido eléctrico (MHEV), el vehículo híbrido eléctrico (HEV), el vehículo el vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV) y el BEV, según un estudio de Isla et al. (2019). El BEV es el único vehículo que no emite gases y aquel con mayor rango de manejo utilizando solo el motor eléctrico, porque los otros tipos de vehículos eléctricos sí requieren del motor de combustión interna, y, por ende, contaminan el medio ambiente. Entre el MHEV, HEV y PHEV, el PHEV tiene un mayor rango de manejo, reduce en mayor cantidad la emisión de gases contaminante, y la ganancia de eficiencia de combustible es la mayor.

**Figura 4**

*Comparativa de las características entre un vehículo MHEV, HEV, PHEV y BEV*

|                                                     | MHEV                                        | HEV                                        | PHEV                                           | BEV                               |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Start/Stop                                          | S                                           | S                                          | S                                              | S                                 |
| Freno regenerativo                                  | S                                           | S                                          | S                                              | S                                 |
| Asistencia de potencia                              | S                                           | S                                          | S                                              | S                                 |
| Manejo 100% eléctrico                               | N                                           | S                                          | S                                              | S                                 |
| Motor eléctrico                                     | 10 kW a 15 kW                               | Más de 20 kW                               | Más de 50kW                                    | Más de 50kW                       |
| Batería                                             | 6-6.5 Ah, <-1 kWh,<br>144-volt, NiMH/Li-ion | 6-6.5 Ah, →1 kWh,<br>330-volt, NiMH/Li-ion | 4-16kWh, Li-ion                                | 10-100kWh, Li-ion                 |
| Voltaje de operación                                | 12 V/144 V                                  | 12 V/500V                                  | 12V/500+V                                      | 12V/500+V                         |
| Rango de manejo máximo                              | Gasolina: ~600 km<br>Eléctrico: 0 km        | Gasolina: ~600 km<br>Eléctrico: 0 km       | Gasolina: ~600 km<br>Eléctrico: 16-96 km       | Eléctrico: 536+ km                |
| Costo adicional de motor y transmisión              | US\$500-1,500                               | US\$1,200-3,000                            | 10-15% costo del vehículo                      | 20-30% costo del vehículo         |
| Reducción de emisiones en la operación del vehículo | 5-20%                                       | ~30%                                       | Hasta 80%<br>[dependiendo del ciclo de manejo] | 100%<br>[sin emisiones del motor] |
| Ganancia de eficiencia de combustible               | 10% a 20%                                   | 20 a 30%                                   | Más de 50%                                     | Sin combustible                   |

Nota. Fuente: Isla, L (2019) pág. 21. “Análisis de Tecnología, Industria, y Mercado para Vehículos Eléctricos en América Latina y el Caribe”

Según Wilber et al. (2021) en un principio los vehículos eléctricos utilizaron baterías de plomo-ácido, sin embargo, posteriormente han sido reemplazadas por las baterías de iones de litio (li-ion). Lo característico de las baterías de iones de litio es su energía específica relativamente alta, su alta densidad energética y su baja tasa de autodescarga. Sin embargo, cuando la temperatura ambiente disminuye, las bajas temperaturas no sólo reducen la capacidad energética y la potencia de las baterías de iones de litio, sino que afectan severamente su degradación. (pág. 8)

Según Wilber et al. (2021) el aumento de la resistencia a la transferencia de carga y el aumento de la viscosidad del electrolito, son otras razones que contribuyen a reducir el rendimiento de las baterías y a su degradación a bajas temperaturas. Las pruebas de laboratorio han demostrado que las temperaturas más bajas provocan reacciones químicas más lentas, menor conductividad del electrolito y menor difusividad de los iones en el ánodo, lo que contribuye a una menor disponibilidad de energía y potencia. (pág. 9)



### **1.3. Formulación del problema.**

#### **1.3.1. Problema Principal.**

- ¿De qué manera se mejora la autonomía de un vehículo eléctrico?

#### **1.3.2. Problemas específicos.**

- ¿Qué valor de eficiencia del coeficiente de performance debe ser el adecuado para el sistema de bomba de calor?
- ¿Cómo afecta la temperatura del medio ambiente al tiempo de carga de la batería?
- ¿Cuánto es el valor del calor transferido del sistema de bomba de calor a la batería?

### **1.4. Justificación e Importancia.**

El objetivo de la investigación es mejorar el rango de autonomía de los coches eléctricos, para evitar que la eficiencia de las baterías varíe en un gran rango cuando la temperatura del medio ambiente es menor a la temperatura ideal de trabajo.

Los propietarios de los vehículos eléctricos se beneficiarán al manejar en climas donde la temperatura sea menor a 20°C, debido a que la eficiencia de la batería no disminuirá en un gran valor. Además, se realizará una menor cantidad de paradas para recargar el vehículo eléctrico si la duración de la batería es mayor.

Con la misma finalidad de beneficiar al propietario del vehículo, se mejorará la experiencia de manejo, debido a que el vehículo recorrerá una mayor distancia en condiciones de baja temperatura.

Según Barros et al. (2018) debido al deterioro medioambiental que afecta severamente al planeta y a la reducción de reservas de petróleo, los motores de combustión interna presentan un problema importante por las emisiones que generan, siendo una alternativa la utilización de vehículos eléctricos. (pág. 11)

En comparación con un coche de combustible tradicional, el motor eléctrico es más eficiente que un motor de combustión interna. Sin embargo, al igual que el motor de combustión interna, la variación de la temperatura afecta en el rendimiento.

Por lo cual, diseñar un sistema que disminuya el efecto de la variación de la temperatura en la batería del vehículo eléctrico beneficiará al medio ambiente, debido a que será una desventaja menos en comparación del motor de combustión interna.

Según la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2015) en el aspecto económico, la compra del vehículo eléctrico representa el principal gasto comparado con otros factores, en base a un estudio del Total Cost of Ownership (TCO). Por ejemplo, el combustible representa entre un 10-15% del gasto total en vehículo eléctrico. En el caso de un vehículo con motor de combustión interna, el costo del combustible es mayor comparado con un motor eléctrico. En función de la tarifa eléctrica seleccionada, en torno al 1.5 €/km frente a los 8 €/km del diésel y 7 €/km del híbrido gasolina, lo que significa un ahorro energético incluso superior al 80% comparados con modelos térmicos usados en las ciudades europeas (pág. 220)

En la figura 5 se presenta una comparación entre el costo del vehículo eléctrico, un vehículo con motor diésel y otro con motor a gasolina.

**Figura 5**

*Comparación entre los costes de un vehículo eléctrico, diésel y gasolina en Barcelona.*

| Coste total (€)                        | Coste (€/Km) | (km/año)                   |
|----------------------------------------|--------------|----------------------------|
| Eléctrico                              | 0,014        | 862 €                      |
| Diésel                                 | 0,080        | 4.825 €                    |
| Gasolina                               | 0,072        | 4.344 €                    |
|                                        |              | (km/año)                   |
| Ahorro Energético Anual VE frente a... |              | 60.000                     |
| modelo diésel evaluado                 |              | 3.963 €                    |
| modelo gasolina evaluado               | HIBRIDO      | 3.482 €                    |
|                                        |              | Periodo explotación (años) |
| Ahorro Energético VE e6 frente a ...   | 5            | 60.000                     |
| modelo diésel evaluado                 |              | 19.813 €                   |
| modelo gasolina evaluado               | HIBRIDO      | 17.408 €                   |

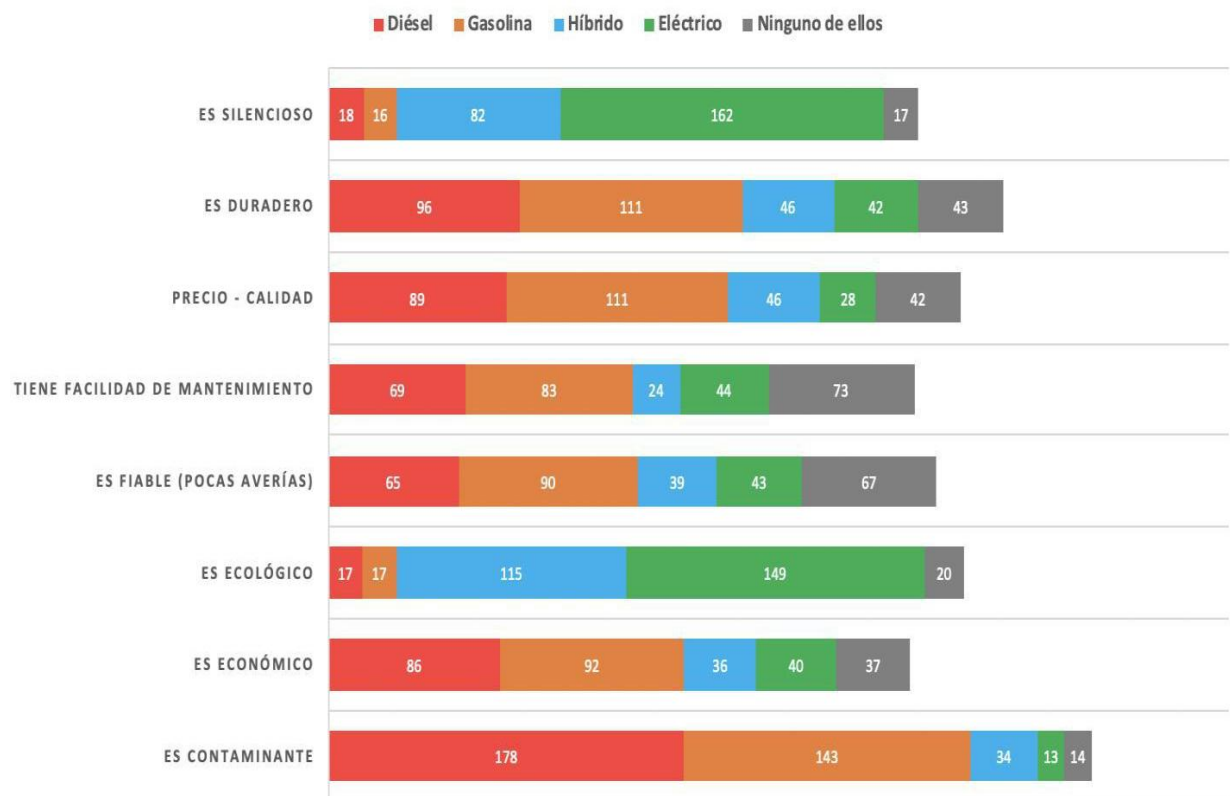
Nota. Fuente: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2015). p. 221. "Guía del vehículo eléctrico II"

En diferentes países, los gobiernos ofrecen subvenciones para la compra de vehículos eléctricos, con el fin de popularizar su uso, por lo que cada vez más personas comprarán este tipo de vehículos, y para una mejor experiencia de uso, el incremento de rango de autonomía es un factor importante.

En la figura 6 se presenta la percepción de las personas respecto al motor del vehículo eléctrico comparado con otros. Además de las ventajas técnicas que ofrece respecto a las otras opciones, la población encuestada destaca que es ecológico y silencioso el motor de un vehículo eléctrico. (Jin, 2020, p. 15)

**Figura 6**

*Percepción de los consumidores respecto a los motores de diferentes tipos de vehículos*



Nota. Fuente: Jin, C. (2020). p. 16. "Coche eléctrico y la batería: situación actual de mercado y su modelo de operación comercial"

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

- Evaluar la factibilidad de utilizar un sistema de bomba de calor para mejorar la autonomía de un vehículo eléctrico.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Calcular el coeficiente de performance del sistema de bomba de calor para mejorar la autonomía del vehículo eléctrico.
- Determinar el tiempo que requiere el sistema de bomba de calor para calentar la batería a la temperatura requerida.
- Determinar el valor del calor transferido del sistema de bomba de calor para calentar la batería.

## **1.6. Hipótesis**

### **1.6.1. Hipótesis General**

- La aplicación de un sistema de bomba de calor para vehículos eléctricos influirá en el rango de autonomía.

### **1.6.2. Hipótesis Específicas**

- El valor del COP del sistema de bomba de calor influirá en el rango de autonomía en condiciones de temperatura baja.
- El tiempo requerido para calentar la batería a la temperatura deseada influirá en el rango de autonomía del vehículo eléctrico.
- El calor transferido del sistema de bomba de calor influirá en la temperatura de la batería.

## 1.7. Variables y Operacionalización de variables.

### 1.7.1. Operacionalización de variables.

En la tabla 1 se presenta la operacionalización de variables del trabajo.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

| Variable                                                    | Definición Conceptual                                                                                                              | Definición Operacional                                                                                  | Dimensiones                                                         | Indicadores                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable independiente:<br>Bomba de calor                   | Máquina térmica que aumenta la temperatura de un cuerpo a través de la transferencia de calor de otro cuerpo de menor temperatura. | Proceso termodinámico que, a través del uso de un refrigerante, transfiere calor de un ambiente a otro. | 1. Temperatura del medio ambiente.<br>2. Temperatura de la batería. | 1. Temperatura del ambiente donde se desplaza el vehículo<br>2. Temperatura de trabajo de la batería. |
| Variable dependiente:<br>Autonomía de un vehículo eléctrico | Distancia de recorrido de un vehículo eléctrico.                                                                                   | Capacidad para desplazamiento del vehículo eléctrico en función al nivel de carga de la batería.        | 1. Distancia recorrida por el vehículo                              | 1. Distancia recorrida según la capacidad de la batería                                               |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

## 1.8. Metodología de la Investigación

### 1.8.1. Unidades de Análisis.

La investigación considerará como unidad de análisis a la batería de un vehículo eléctrico Nissan Leaf del 2018, con una capacidad de 40 kWh. La batería es del tipo ion de litio, con un voltaje de 360 voltios, con 48 módulos y con un peso entre 273 y 296 kg. El rango de autonomía es de 160 millas con la batería completamente cargada, y la velocidad máxima estimada es de 144 kilómetros por hora.

### **1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación.**

La investigación con respecto al punto de vista del enfoque es cuantitativa, debido a que seis de las siete características epistemológicas están asociadas a este enfoque. A continuación, se explicará el análisis de cada una:

- Desde la percepción de la realidad, es objetiva debido a que los datos son obtenidos en base a instrumentos de medición y no son influenciados por factores externos.
- El razonamiento es deductivo, porque se parte de lo general hacia lo particular para validar la hipótesis.
- La finalidad es comprobación y confirmación, se analizan cinco situaciones diferentes, y en base a un análisis, se determinará un resultado.
- Está orientada al resultado, debido a que el objetivo de la investigación está enfocado en cumplir ciertos parámetros para su validación.
- El principio de la verdad es particularista y se centra en similitudes.
- Desde la perspectiva de investigador, es desde afuera, porque el investigador no involucra sus creencias en el análisis.
- La causalidad se basa en la interacción de factores.

Desde el punto de vista del alcance, la investigación es del tipo explicativo, porque se busca la relación causa efecto entre los diferentes casos considerados en la investigación para obtener la mayor distancia de recorrido del vehículo eléctrico.

### **1.8.3. Diseño de la Investigación.**

El diseño de la investigación corresponde a un diseño experimental, debido a la temperatura de trabajo del sistema de la bomba de calor varía en un determinado rango para analizar en cuánto aumenta el rango de autonomía del vehículo eléctrico.

#### **1.8.4. Fuentes de Información.**

Se consideraron las siguientes fuentes primarias de información para la investigación:

- Tabla termodinámica del refrigerante utilizado
- Propiedades de la batería de la unidad de análisis

Se consideraron las siguientes fuentes secundarias de información para la investigación:

- Antecedes investigativos
- Manual del vehículo eléctrico

#### **1.8.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.**

Para determinar las propiedades del refrigerante a usar en el sistema de bomba de calor, se utilizará la tabla del Anexo 2, que señala diversos valores de diferentes parámetros según se conozca la presión o temperatura. En base a los datos se determinará los valores según las propiedades de trabajo del refrigerante.

Por otra parte, en base a registros históricos, el cual se efectuará en base al formato del Anexo 4 y Anexo 5, se obtendrá los valores de las características técnicas de la unidad de análisis, especialmente de la capacidad de la batería y el rango de recorrido.

#### **1.8.6. Análisis y Procesamiento de Datos.**

Para el procesamiento de la información de cada una de las variables definidas para diferentes valores a la cual será elevada la temperatura de la batería, se utilizará el software Microsoft Excel. La temperatura de la batería incrementará en un valor de  $0.5^{\circ}\text{C}$ , partiendo de una temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  a una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ , y se elaborará una tabla resumen de los valores para un sistema de una sola bomba de calor. Finalmente, se desarrollarán gráficas que permitirán comparar cómo varía la eficiencia del sistema de

bomba de calor a diferentes temperaturas y otras variables cuando se utilice más de una bomba de calor.

En base a los cuadros y gráficas obtenidas en el procesamiento de la información, se determinará que caso es el más favorable o eficiente según las condiciones del entorno, debido a que se considerará factores como el tiempo y consumo energético, y se buscará un balance entre efectividad del sistema y comodidad del usuario final.



## **CAPÍTULO II. Marco Teórico y Marco Conceptual**

### **2.1 Bases Teóricas.**

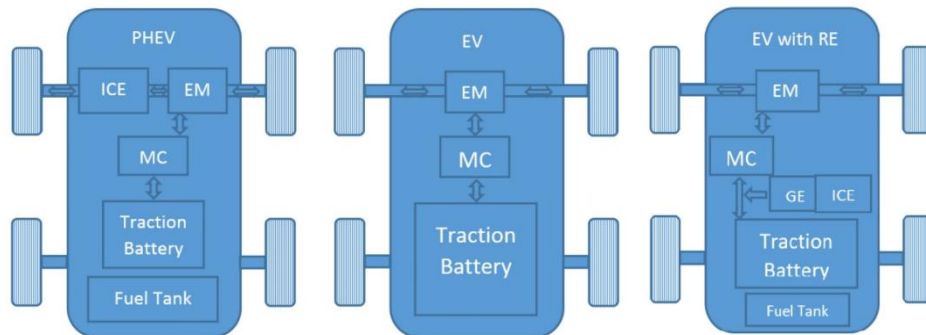
#### **2.1.1 Vehículo eléctrico**

Barros et al. (2018) en la tesis titulada “Análisis y Diseño de la Instalación Eléctrica de una Electrolinera en la Ciudad de Cuenca”, realizaron un estudio sobre los tipos de vehículos eléctricos y sus características eléctricas para diseñar una electrolinera. El vehículo eléctrico, que es impulsado por una batería, transporta pasajeros sin utilizar combustibles fósiles. Se fabrican desde vehículos ligeros como los taxis, hasta buses de transporte que circulan en las ciudades. Las principales características de los vehículos eléctricos son un sistema de propulsión accionado por un motor eléctrico, un sistema de control que regula la velocidad y aceleración y un sistema de almacenamiento de energía.

Wager (2017) en la tesis titulada “Energy Efficiency of Electric Vehicles and Recharging Technologies under Consideration of Usage Profiles”, describió el conjunto de componentes del tren de potencia que generan y transmiten la potencia a las ruedas del vehículo. El diseño de un tren de potencia es complejo comparado con el de un motor de combustión interna, debido al elevado costo y las distribuciones de peso para la seguridad y la dinámica del vehículo. En la figura 7 se presenta los diagramas de bloques que describen la disposición de un tren de potencia típico para vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV), vehículos eléctricos (EV) y vehículos eléctricos con rango extendido (EV with RE), debido a que todos estos tipos de vehículos utilizan la energía eléctrica almacenada en la batería para generar la potencia de tracción.

**Figura 7**

*Representación de los trenes de potencia de un PHEV (izquierda), un EV (centro) y un EV with RE (derecha) mediante diagrama de bloques.*



Nota. Fuente: Wager, G. (2017) pág. 2-4. “Energy Efficiency of Electric Vehicles and Recharging Technologies under Consideration of Usage Profiles”

Según Wager (2017) el motor eléctrico (EM) en el tren de potencia es accionado por la energía eléctrica almacenada en la batería (Traction Battery) y es controlado por el controlador del motor (MC) según la demanda del conductor. La energía eléctrica se convierte en energía rotativa para mover los componentes del tren de potencia, como la caja de cambios, los árboles de transmisión, los rodamientos y las ruedas. Si es necesario reducir la velocidad, el controlador del motor operará el motor eléctrico como un generador, convirtiendo la energía cinética en energía eléctrica y almacenándola en la batería. En algunos casos, dependiendo de la configuración del tren de potencia del PHEV, el motor de combustión interna (ICE) trabaja en conjunto con el EM para proporcionar una potencia adicional. La energía proveniente del ICE se convierte en la principal fuente de energía para el desplazamiento del vehículo, mientras que el motor eléctrico pasa a un segundo plano.

### **2.1.2 Tipos de baterías**

Según Ryan (2021) en la tesis de maestría titulada “Optimizing Electric Vehicle Capacity for Frequency Containment Reserves”, las baterías son dispositivos que almacenan energía eléctrica para un uso posterior, mediante energía química. Las baterías están formadas por celdas que son apiladas entre sí para producir los valores nominales

deseados. Los valores de medición de las baterías son el voltaje, amperios-hora, la tasa de carga/descarga, entre otros. A partir de estos valores, se determina la energía de la batería, que es igual a la multiplicación del voltaje y amperios hora y la potencia, que es la división entre la energía por la tasa de carga/descarga.

Jin (2020) en la tesis titulada “Coche eléctrico y la batería: situación actual de mercado y su modelo de operación comercial”, realizó un estudio sobre los factores más importantes para la compra de un vehículo eléctrico y las diferentes opciones de baterías en los vehículos eléctricos. En la figura 8 se presenta seis tipos de baterías utilizadas en la industria automotriz y sus características.

**Figura 8**

*Comparación entre los diferentes tipos de baterías.*

| Tipo de batería                        | Ciclo de vida | Densidad(Wh/Kg) | Necesidad mantenimiento        | Ventajas                                                                                               | Desventajas                                                                                                                         |
|----------------------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Plomo-ácido</b>                     | 500-800       | 30-80           | Sí y periódica                 | Menor coste de adquisición<br>Eficiente ante temperatura baja                                          | Son pesadas<br>El plomo es tóxico<br>Lentitud de carga                                                                              |
| <b>Níquel-cadmio (NiCd)</b>            | 1500-2000     | 40-60           | Sí, pero menos que plomo-ácido | Menor fallos comparando con plomo-ácido<br>Se puede reciclar totalmente                                | Alto coste de adquisición<br>Tiene efecto de memoria<br>Es contaminante                                                             |
| <b>Níquel-hidruro metálico (NiMH)</b>  | 300-500       | 30-80           | Sí y frecuente                 | Tiene menos efecto de memoria que Níquel-cadmio                                                        | Menos fiable que níquel-cadmio<br>No soporta fuertes descargas y altas corrientes de carga<br>No es resistente a temperaturas altas |
| <b>Ion-litio (LiCo02)</b>              | 400-1200      | 100-250         | No requiere                    | Alta densidad energética<br>Tamaño reducido y peso ligero<br>Alta eficiencia y no tiene efecto memoria | Alto coste de producción<br>Es frágil<br>Necesidad de circuito de seguridad<br>Necesidad de un almacenaje cuidadoso                 |
| <b>Ion-litio con cátodo de LiFeP04</b> | 2000          | 90-100          | No                             | Mayor seguridad<br>Mayor estabilidad<br>Mayor potencia                                                 | Menor densidad energética<br>Mayor coste de adquisición                                                                             |
| <b>Polímero de litio (LiPo)</b>        | 1000          | 300             | No                             | Mayor densidad energética<br>Más ligeras<br>Mas eficiente                                              | Precio muy elevado<br>Ciclo de vida corto                                                                                           |

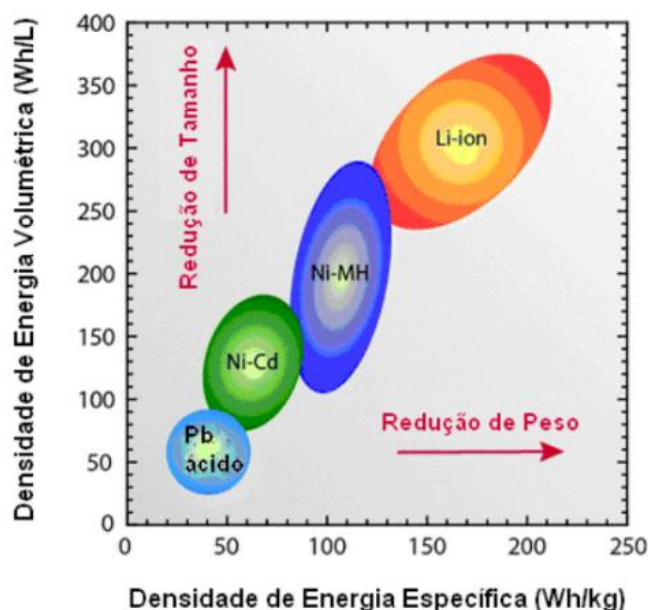
Nota. Fuente: Jin, C. (2020). pág. 23. “Coche eléctrico y la batería: situación actual de mercado y su modelo de operación comercial”

Según Arias (2015) en la tesis titulada “Influencia del vehículo eléctrico sobre la fiabilidad de los sistemas eléctricos”, las baterías de ácido-plomo (Pb ácido) se utilizaron en los primeros vehículos eléctricos. Sin embargo, en la década de 1990, las baterías de níquel-hidruros metálicos (Ni-Cd y Ni-MH) experimentaron un avance en términos de densidad de energía volumétrica (Wh/L) y densidad de energía específica (Wh/kg), por lo cual fueron utilizadas en vehículos eléctricos. Sin embargo, las baterías de iones de litio

(Li-ion) son consideradas como las más atractivas para los fabricantes de automóviles debido a las características que presentan en comparación a los otros tipos de batería, como se presenta en la figura 9.

**Figura 9**

*Comparación de la densidad de energía volumétrica (eje y) y densidad de energía específica (eje x) de cuatro tipos de baterías.*



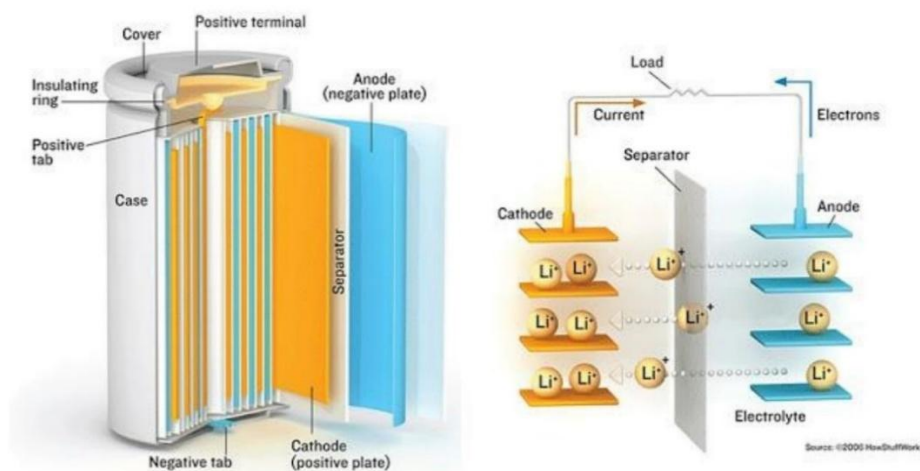
Nota. Fuente: Arias, P. (2015). pág. 14. "Influencia del vehículo eléctrico sobre la fiabilidad de los sistemas eléctricos"

### 2.1.3 Comportamiento termodinámico de la batería de iones de litio

Moser (2015) en la tesis titulada "Medición experimental del comportamiento térmico de una batería de ión-litio", definió el concepto de celda, el cual se refiere a la unidad básica de una batería. Las celdas se emplean en dispositivos electrónicos como teléfonos móviles, cámaras y controles remotos para almacenar energía. La celda de iones de litio es un dispositivo que almacena energía eléctrica y está compuesto por un ánodo, un cátodo, un separador y un electrolito. Durante la descarga, los iones se mueven del ánodo al cátodo a través del electrolito, y el separador prevé el contacto directo entre el ánodo y cátodo. Cuando el circuito entre el ánodo y el cátodo se cierra, se produce un flujo de electrones que da lugar a una corriente eléctrica, como se presenta en la figura 10.

**Figura 10**

*Componentes de una celda de iones de litio (izquierda) y flujo de trabajo (derecha)*



Nota. Fuente: Moser, F. (2015). pág. 5. “Medición experimental del comportamiento térmico de una batería de ión-litio”

### **2.1.3.1 Impacto negativo de la temperatura sobre las baterías**

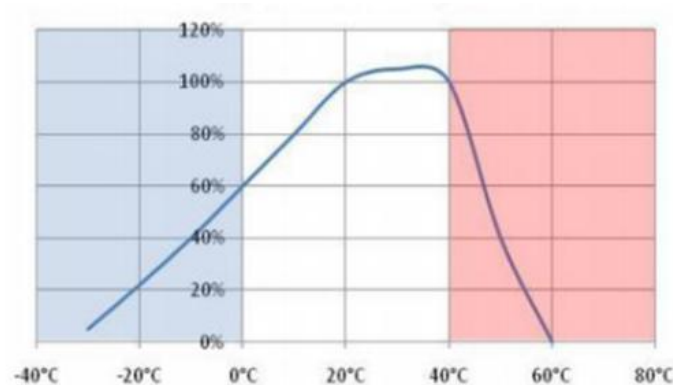
Según Moser (2015) se debe considerar el calor generado por las baterías de ión-litio, debido a que afecta significativamente la vida útil y la capacidad de la batería, tanto por altas temperaturas de operación como por la falta de homogeneidad de la temperatura a lo largo de la celda y de la batería. El rango de la temperatura de las celdas debe ser entre los 25°C y 40°C, para evitar una disminución el rendimiento, la vida útil de la batería y la pérdida de capacidad por envejecimiento térmico. Para temperaturas de operación en el rango de 70°C a 180°C, existe un daño en la celda y la posibilidad de ocasionar una explosión, lo cual es un riesgo para los pasajeros. Debido a esto, es importante minimizar el impacto de la temperatura sobre la batería y así reducir los riesgos asociados a un sobrecalentamiento.

Li et al. (2014) en la tesis titulada “Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles”, realizaron un estudio sobre el comportamiento termodinámico de las baterías de los vehículos eléctricos. El rendimiento de las baterías de iones de litio depende tanto de la temperatura como del voltaje, las cuales operan correctamente en un rango definido. Además, la temperatura debe controlarse cuidadosamente, porque al trabajar a una

temperatura inferior a la temperatura de funcionamiento ralentizará las reacciones químicas, y por ende, reducirá la capacidad de la batería. Por otro lado, trabajar con un exceso de temperatura, aumentará la disipación de calor y producirá un desbordamiento térmico. Por lo cual, la distribución de la temperatura debe ser uniforme para garantizar el rendimiento y la vida útil de la batería. En la figura 11 se presenta la variación de la capacidad de la batería (%) en función de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), donde a una temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  la capacidad se reduce al 60%, mientras que a una temperatura entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $40^{\circ}\text{C}$ , la capacidad es máxima.

**Figura 11**

*Capacidad de la batería en función de la temperatura.*



Nota. Fuente: Li, J., et al. (2014). pág. 6. "Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles"

#### **2.1.4 Ciclo de Carnot**

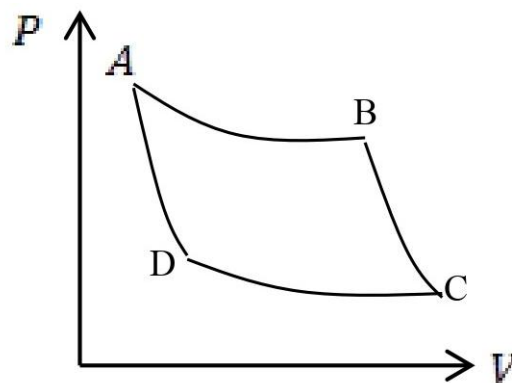
Forero (2013) en la investigación titulada "Sadi Carnot, el ciclo ideal", explica que la condición de máxima eficiencia se alcanza cuando no hay ningún cambio de temperatura en el cuerpo que no se deba a un cambio de volumen. Para que se pueda realizar trabajo, se requiere un cambio de volumen, lo que a su vez implica un cambio de temperatura debido al calor. Por ejemplo, si se calienta un cilindro que contiene un gas, el gas se expande y realiza trabajo exterior. Para lograr la máxima eficiencia, todo el calor transferido debe emplearse solo en el cambio de volumen, y no en calentar el recipiente antes de que ocurra la expansión o contracción del gas. Por lo tanto, el ciclo de máxima eficiencia consta de procesos isotérmicos y adiabáticos. En una compresión o expansión isotérmica, todo el

calor transferido se utiliza solo en el cambio de volumen, mientras que, en una expansión o compresión adiabática, el cambio de temperatura se debe exclusivamente al cambio de volumen.

Según Forero (2013) en la figura 12 se presenta un ciclo en el cual se integran estos procesos. Se observa una expansión isotérmica (de A hacia B), una expansión adiabática (de B hacia C), una compresión isotérmica (de C hacia D) y una compresión adiabática (de D hacia A). Durante los primeros dos procesos, el cuerpo realiza trabajo exterior, mientras que en los últimos dos se realiza trabajo interior sobre el cuerpo. El trabajo exterior es mayor que el trabajo interior, lo que resulta en un trabajo neto debido exclusivamente a la transferencia de calor entre el foco caliente y el foco frío.

**Figura 12**

*Diagrama PV del Ciclo de Carnot.*



Nota. Fuente: Forero, S. (2013). pág. 3. "Sadi Carnot, el ciclo ideal"

### **2.1.5 Bombas de calor**

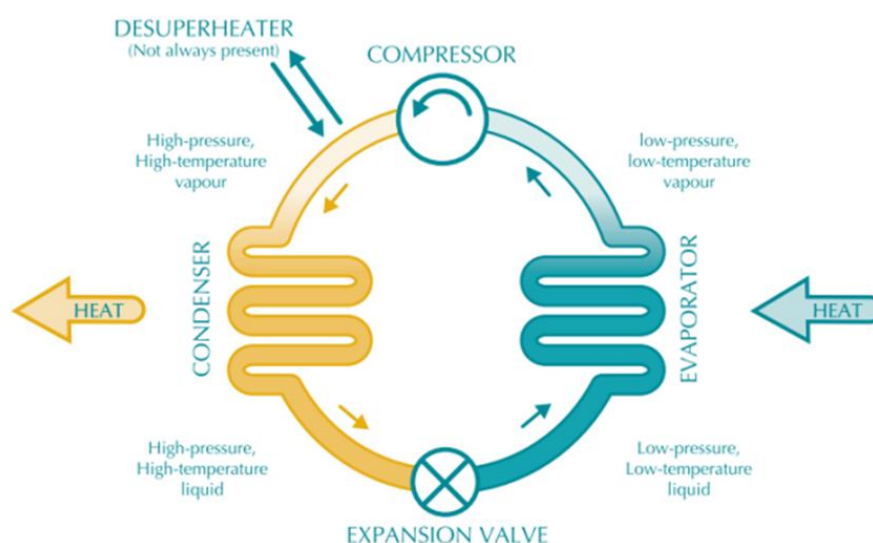
Badiali et al. (2009) en la tesis titulada "Dynamic Modelling of Mechanical Heat Pumps for Comfort Heating", realizaron un modelado de una bomba de calor para estudiar su comportamiento cuando se presenta una variación en los parámetros de funcionamiento. La bomba de calor se define como una máquina que opera según el ciclo inverso, transfiere calor de un entorno de menor temperatura a uno de mayor temperatura, a través del uso de un compresor.

Según Baniasadi (2020), en la tesis titulada “Application of heat pumps and thermal storage systems for improved control and performance of microgrids”, existen diversos tipos de bombas de calor que se categorizan en función de sus fuentes de calor, tales como el aire ambiente, el agua o el suelo. Las bombas de calor aerotérmicas, por ejemplo, capturan la energía del aire circundante y la distribuyen por todo el edificio. Su consumo de energía está relacionado con la temperatura interior del edificio, mientras que los sistemas de bomba de calor aire-agua o tierra-agua son más flexibles y están sujetos a la influencia de las temperaturas del sumidero y de la fuente, lo que afecta la eficiencia de la bomba de calor. A pesar de que se han realizado numerosos avances en la tecnología de las bombas de calor para mejorar su COP y su eficiencia energética, todavía existen desafíos en el diseño y la integración del sistema.

Según Badiali et al. (2009) los principales componentes de la bomba de calor son el compresor, la válvula de expansión y los dos intercambiadores de calor, conocidos como el evaporador y condensador. Estos se encuentran conectados en un circuito cerrado por donde circula el fluido, como se presenta en la figura 13.

**Figura 13**

*Ciclo termodinámico de una bomba de calor.*



Nota. Fuente: Badiali, S., et al. (2009). pág. 14. “Dynamic Modelling of Mechanical Heat Pumps for Comfort Heating”



A continuación, se describirá brevemente los cuatro procesos que se presentan en un ciclo termodinámico de una bomba de calor:

- En el proceso de compresión, a través de un compresor, se incrementa la temperatura y presión del fluido.
- En el proceso de condensación, a una presión constante, se entrega calor a través del condensador y la temperatura del fluido disminuye.
- En el proceso de expansión, a través de una válvula de expansión, la presión y temperatura del fluido disminuye.
- En el proceso de evaporación, a una presión constante, el sistema recibe calor a través del evaporador y la temperatura del fluido aumenta.

#### **2.1.6 Eficiencia de la bomba de calor**

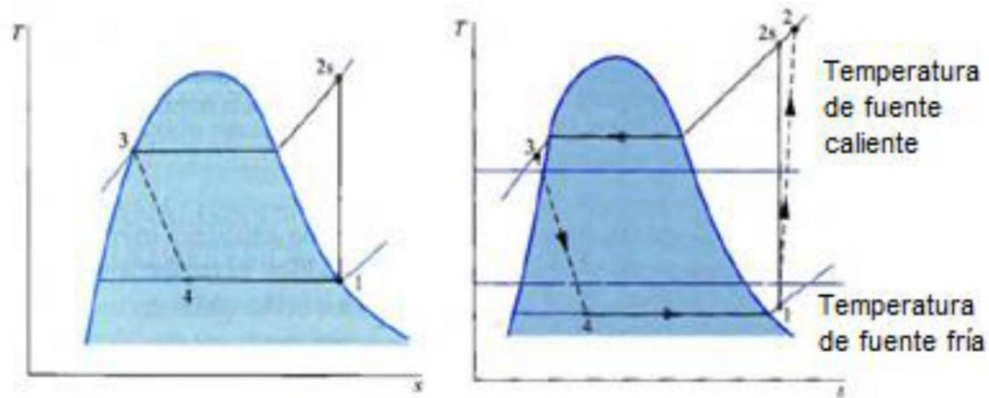
Thompson (2012) en la tesis titulada “Modeling Air Source Heat Pump Adoption Propensity and Simulating the Distribution Level Effects of Large-Scale Adoption”, explica que para cuantificar la eficiencia de los modelos de ASHP (bomba de calor de fuente de aire por sus siglas en inglés), los fabricantes prueban y califican el equipo de acuerdo con la norma AHRI 210/240: Rendimiento de equipos unitarios de aire acondicionado y bombas de calor de fuente de aire. Una de ellas es el COP, que representa la relación entre la cantidad de energía térmica entregada a un espacio, medida en Watts, y la energía eléctrica consumida por la bomba, también medida en Watts. El COP es una unidad de medida adimensional.

Según De Leon Ruiz (2015) en la tesis titulada “Modelo matemático y diseño de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar para calentamiento de agua”, los procesos termodinámicos son necesariamente irreversibles debido a que siempre existe una pérdida de energía. Las irreversibilidades en un ciclo de compresión son variadas, como el calor generado por la fricción entre las partes móviles del compresor

y la caída de presión en los serpentines del evaporador y condensador. En la figura 14 se presentan los diagramas temperatura-entropía para el caso ideal y real.

**Figura 14**

*Diagrama ideal (izquierda) y diagrama real (derecha) de un ciclo de compresión.*



Nota. Fuente: Leon Ruiz, J. (2015). pág. 12. "Modelo matemático y diseño de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar para calentamiento de agua"

### 2.1.7 Transferencia de calor

Según Holman (1998) en el libro "Transferencia de calor", la ciencia de la transferencia de calor se enfoca en la predicción del intercambio de energía entre cuerpos materiales debido a una diferencia de temperatura. Se define como calor la transferencia de energía térmica y la transferencia de calor no solo explica cómo transferir la energía térmica, sino que también predice la rapidez con la que la transferencia tendrá lugar en condiciones específicas.

Existen tres tipos de transferencia de calor, que se mencionan a continuación:

### 2.1.8 Transferencia de calor por conducción

Según Holman (1998) cuando existe una diferencia de temperatura en un objeto, la energía se mueve de la zona de alta temperatura hacia la zona de baja temperatura. Al proceso se le conoce como transferencia de calor por conducción, y la cantidad de calor que se transfiere por unidad de área está relacionada directamente con la diferencia de temperatura, como vemos en la primera ecuación:

$$Q = -kA \frac{\delta T}{\delta x} \quad (1)$$

Donde:

Q: Flujo de calor (W)

A: Área transversal (m<sup>2</sup>)

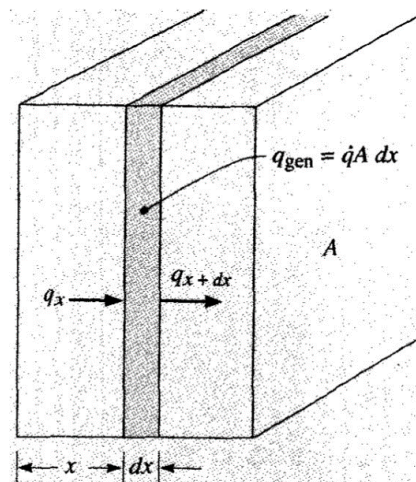
$\frac{\delta T}{\delta x}$ : Gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor (K/m)

k: Conductividad térmica del material (W/m\*K)

Según Holman (1998) el signo menos colocado por delante de la conductividad térmica del material en la ecuación es para cumplir con la segunda ley de la termodinámica; que dice que la transferencia de calor debe ser del cuerpo de mayor temperatura al de menor, como se presenta en la figura 15.

**Figura 15**

*Análisis de la conducción de calor unidimensional en un cuerpo.*



Nota. Fuente: Holman, J. (1998). pág. 2. "Transferencia de Calor"

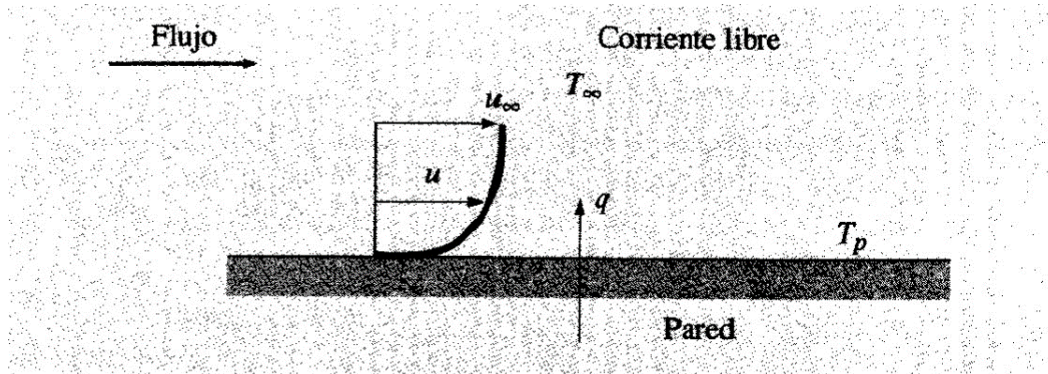
### 2.1.9 Transferencia de calor por convección

Según Holman (1998) se conoce por transferencia de calor por convección aquella transferencia, que a diferencia de la conducción que se da a través de un cuerpo sólido, se da por un fluido. La figura 16 presenta una placa caliente con temperatura  $T_p$  y un fluido

con temperatura  $T_{\infty}$ . La velocidad de la corriente se reduce a cero en la placa debido a la viscosidad del fluido, lo que significa que el calor solo es transferido por conducción.

**Figura 16**

*Ejemplo de transferencia de calor por convección a través de una placa.*



Nota. Fuente: Holman, J. (1998). pág. 8. "Transferencia de Calor"

Se utiliza la segunda ecuación para determinar el calor transferido por convección:

$$q = hA(T_p - T_{\infty}) \quad (2)$$

Donde:

q: Flujo de calor (W)

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección ( W/m<sup>2</sup> \* °C)

A: Área transversal (m<sup>2</sup>)

T<sub>p</sub>: Temperatura de la placa (°C)

T<sub>∞</sub>: Temperatura del fluido (°C)

Según Holman (1998) en algunos sistemas se realiza un cálculo analítico del coeficiente de transferencia de calor por convección. Por lo mencionado anteriormente, la viscosidad del fluido y sus propiedades térmicas, como el calor específico, conductividad térmica y la densidad, son factores que influyen en la transferencia de calor por convección. Esto se debe porque la viscosidad influye en el perfil de velocidades y en el flujo de energía en la región próxima a la pared. Por ejemplo, cuando una placa caliente se expone al aire

que la rodea sin que exista un algún externo que lo mueva, el aire empezará a moverse debido al gradiente de la densidad.

#### 2.1.10 Transferencia de calor por radiación

La transferencia de calor por radiación se da cuando existe un vacío entre los cuerpos. Un cuerpo negro emitirá energía a través de la ley de Stefan-Boltzmann, como se presenta en la tercera ecuación:

$$q_{emitido} = \sigma AT^4 \quad (3)$$

Donde:

$q_{emitido}$ : Flujo de calor (W)

A: Área de superficie ( $m^2$ )

T: Temperatura absoluta del cuerpo (K)

$\sigma$ : Constante de Stefan – Boltzman ( $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

Según Holman (1998) la ecuación sólo es válida para un cuerpo negro que emite radiación. Para el intercambio de radiación entre dos superficies, donde una de ellas se encuentra totalmente rodeada por la otra, como vemos en la cuarta ecuación:

$$q = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

Donde:

q: Flujo de calor (W)

$\varepsilon_1$ : Emisividad

A1: Área de superficie radiante ( $m^2$ )

T1: Temperatura de la superficie encerrada (K)

T2: Temperatura de la superficie circundante (K)

$\sigma$ : Constante de Stefan – Boltzman ( $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

## 2.2 Marco Conceptual

- Bomba: Equipo mecánico que, a través del incremento de presión y temperatura, incrementa la energía de un fluido que es conducido a través del equipo.
- Celda: Dispositivo que transforma la energía de las reacciones químicas en energía eléctrica, similar a una pila.
- Ciclo: Serie de estados por los que un fluido circula repetitivamente y experimenta un cambio en sus propiedades.
- Cuerpo: Objeto físico que posee masa, peso y volumen con características propias.
- Energía: Capacidad de un sistema para realizar trabajo. Es una propiedad de los objetos y sistemas físicos que les permite cambiar su estado o su entorno.
- Fase: Estado particular de la materia en el que se encuentra una sustancia, como sólido, líquido o gas.
- Pasta: Masa moldeable producto de la mezcla de diversas sustancias.
- Vehículo: Máquina que transporta personas u objetos de un punto hacia otro a través pistas o sobre la tierra.

### **CAPÍTULO III. Desarrollo del Trabajo de Investigación**

El desarrollo del trabajo de investigación ha sido elaborado en base a la condición de la temperatura que afecta en el rendimiento de la batería de un vehículo eléctrico. Se decidió considerar una temperatura del medio ambiente de 0°C en base a la información encontrada en las investigaciones, ya que se registra una considerable reducción del rango de recorrido del vehículo eléctrico.

Para fines de comparación y análisis, se decidió considerar elevar la temperatura de la batería hasta 15°C, y posteriormente, en base a unos parámetros, comparar el comportamiento del sistema de bomba de calor a medida que aumenta la temperatura, para luego realizar un balance entre tiempo de recarga y rango de recorrido extendido. Además, el sistema de bomba de calor funcionará mientras el vehículo se encuentre recargando la batería, por lo que el consumo eléctrico será directo de la estación de recarga y no de la batería del vehículo.

El vehículo eléctrico escogido para el análisis ha sido el Nissan Leaf del año 2018, debido a la información disponible que se ha encontrado y utilizado en la investigación. En el anexo 4, 5 y 6 se presentan las características técnicas del vehículo y de la batería, que posteriormente se utilizará en los cálculos.

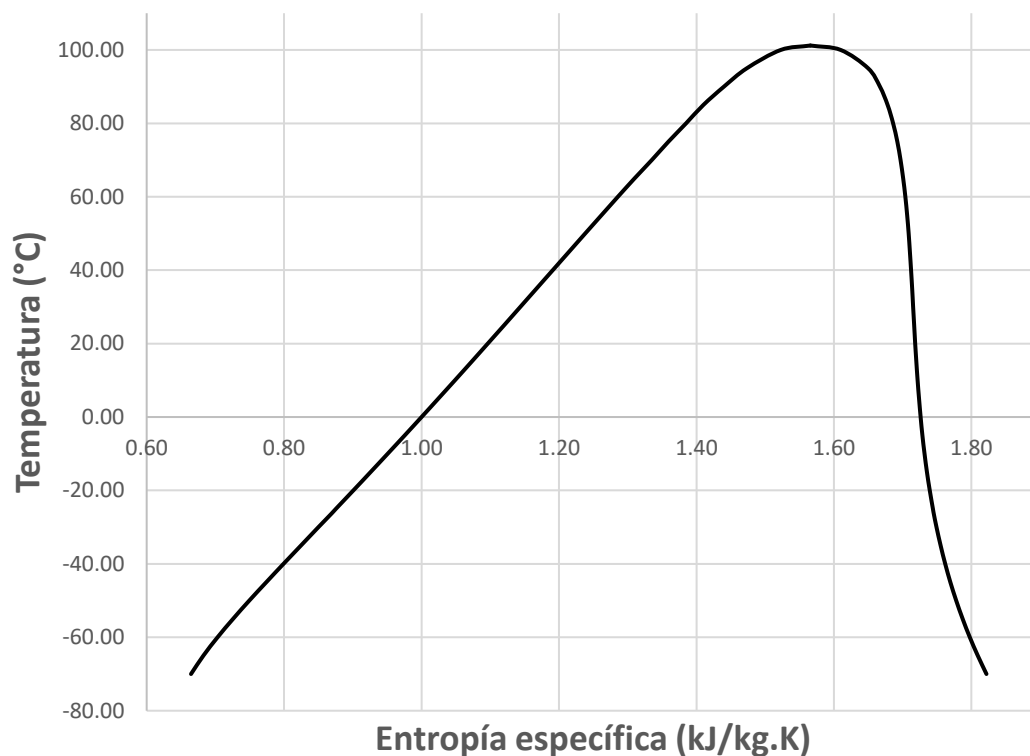
Para el sistema de bomba de calor presentado en la investigación, el refrigerante a usar es el R134a, el cual se escogió debido a su fácil disponibilidad y numerosas aplicaciones en sistemas termodinámicos. A través del diagrama de temperatura y entropía (diagrama T – s), se analizará las propiedades del refrigerante para diferentes valores de presión y temperatura.

En la figura 17 se presenta el gráfico del diagrama T - s del refrigerante R134a elaborado en Excel, en el cual se agregará los puntos importantes de la investigación. El análisis inicia en la salida del evaporador o entrada del compresor, en estado de vapor saturado del refrigerante. La temperatura escogida ha sido de -10°C, debido a que se

encuentra dentro del rango que trabajan los compresores con el refrigerante R134a, y a la vez, al ser la temperatura en el evaporador del refrigerante, asegura la transferencia de calor del medio ambiente, que se encuentra a una mayor temperatura ( $0^{\circ}\text{C}$ ), al sistema de bomba de calor.

**Figura 17**

*Diagrama T - s del refrigerante R134a.*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 18 se presenta la ubicación del punto 1 en el diagrama T – s, el estado es vapor saturado en la entrada del compresor, a una temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ , y según el software CATT3, con las dos condiciones mencionadas, el valor de la presión es  $0.2006 \text{ MPa}$ . En la tabla 2 se indican valores como la entalpía específica (h), volumen específico (v), energía interna específica (u), entropía específica (s) y la calidad de la mezcla (X) para las condiciones de la temperatura y estado del refrigerante.



**Tabla 2**

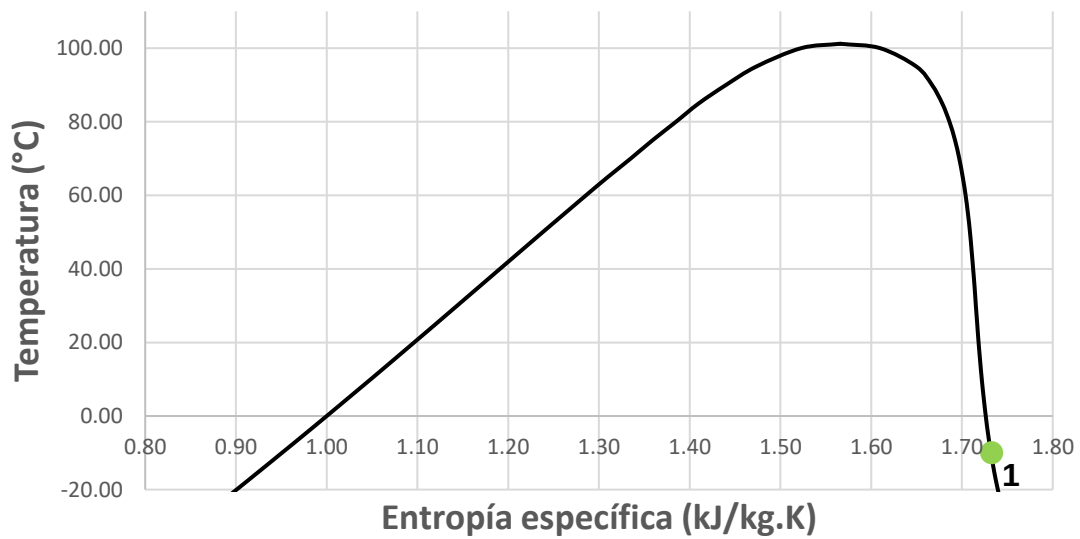
*Características termodinámicas del punto 1*

| Punto | P(MPa) | T(°C) | h<br>(kJ/kg) | v (m³/kg) | u<br>(kJ/kg) | s<br>(kJ/kg.K) | X (%) | Estado         |
|-------|--------|-------|--------------|-----------|--------------|----------------|-------|----------------|
| 1     | 0.2006 | -10   | 392.7        | 0.09959   | 372.7        | 1.733          | 100   | Vapor saturado |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 18**

*Ubicación del punto 1 en el diagrama T - s*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

Definida la temperatura de evaporación en el evaporador, ahora se definirá la temperatura de condensación en el condensador, la cual debe ser mayor que 0°C para que la batería del vehículo aumente su temperatura. En este caso, se escoge una temperatura de condensación de 30°C, la cual es diferente a la temperatura ideal y real a la salida del compresor, pero con el valor de la temperatura de condensación conocida, se determina el valor de presión que le correspondería en el estado líquido-saturado al refrigerante, la cual es 0.7702 MPa según el software CATT3. El valor de la presión es importante porque será constante en la zona de vapor sobresaturado, donde se ubican la temperatura del ideal y real. Para este caso, se considera una eficiencia isentrópica del 80% del compresor.

En la figura 19 se presenta la ubicación del punto 2 en el diagrama  $T - s$ , el cual representa el estado ideal del vapor sobrecalentado en la salida del compresor. El valor de la entropía se mantiene constante al valor del punto 1, 1.733 kJ/kg.K, y el valor de la presión es igual al valor de la presión en el condensador, 0.7702 MPa. Con el valor de la entropía y el valor de la presión conocidos, se utilizará el CATT3 para determinar los demás valores que se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3**

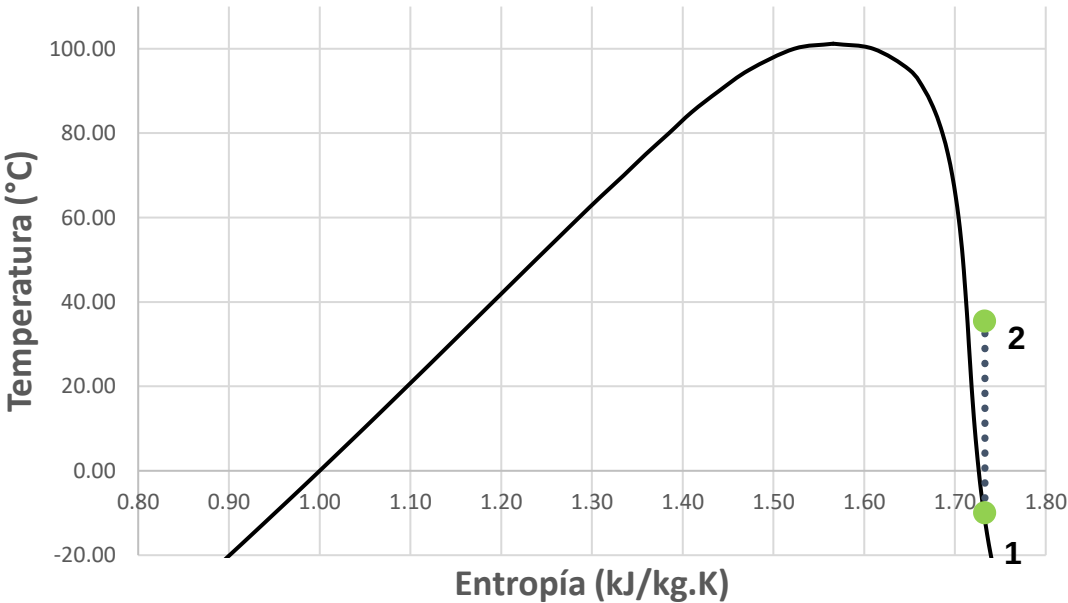
*Características termodinámicas del punto 2*

| Punto | P(MPa) | T(°C) | h<br>(kJ/kg) | v (m <sup>3</sup> /kg) | u<br>(kJ/kg) | s<br>(kJ/kg.K) | X (%) | Estado                          |
|-------|--------|-------|--------------|------------------------|--------------|----------------|-------|---------------------------------|
| 1     | 0.2006 | -10   | 392.7        | 0.09959                | 372.7        | 1.733          | 100   | Vapor saturado                  |
| 2     | 0.7702 | 35.49 | 420.6        | 0.02757                | 399.4        | 1.733          | -     | Vapor sobrecalentado<br>(ideal) |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 19**

*Ubicación del punto 2 en el diagrama  $T - s$*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

Como se ha mencionado anteriormente, se considera que el valor de la eficiencia isentrópica del compresor es del 80%, y conocido los valores de la entalpía en los puntos 1 y 2, se determina el valor real de la entalpía, representado en la gráfica por el punto 2', a través de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

$$0.8 = \frac{420.6 - 392.7}{h_{2'} - 392.7}$$

$$h_{2'} = 427.575 \text{ kJ/kg}$$

Conocido el valor de la entalpía del punto 2', y con el valor de la presión igual al del condensador, 0.7702 MPa, se obtiene el valor de los demás parámetros en CATT3 como se presenta en la tabla 4, y en la figura 20 se presenta la ubicación del punto 2' en el diagrama T - s.

**Tabla 4**

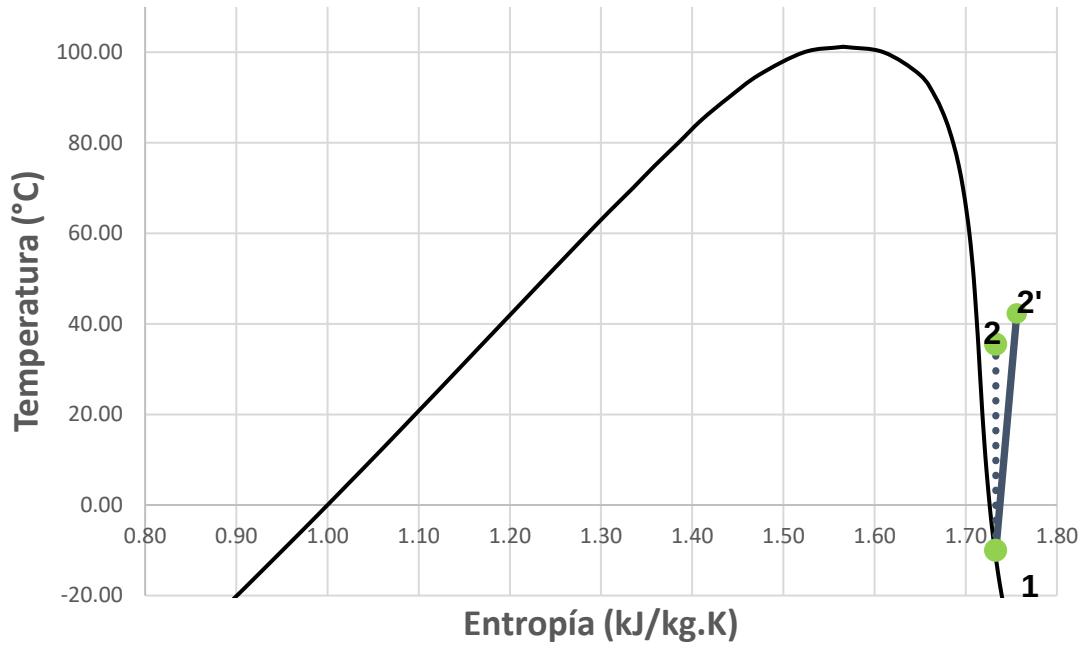
*Características termodinámicas del punto 2'*

| Punto | P(MPa) | T(°C) | h<br>(kJ/kg) | v (m <sup>3</sup> /kg) | u<br>(kJ/kg) | s<br>(kJ/kg.K) | X (%) | Estado                         |
|-------|--------|-------|--------------|------------------------|--------------|----------------|-------|--------------------------------|
| 1     | 0.2006 | -10   | 392.7        | 0.09959                | 372.7        | 1.733          | 100   | Vapor saturado                 |
| 2     | 0.7702 | 35.49 | 420.6        | 0.02757                | 399.4        | 1.733          | -     | Vapor sobresaturado<br>(ideal) |
| 2'    | 0.7702 | 42.28 | 427.575      | 0.02866                | 405.5        | 1.756          | -     | Vapor sobresaturado<br>(real)  |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 20**

*Ubicación del punto 2' en el diagrama T - s*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 23 se presenta la ubicación del punto 2'' en el diagrama T – s, el cual representa el estado de vapor saturado a una presión de 0.7702 MPa, y en el sistema de bomba de calor se ubica en la entrada del condensador. Con el estado de vapor saturado y el valor de la presión, se calcula los demás parámetros, los cuales se presenta en la tabla 5.

**Tabla 5**

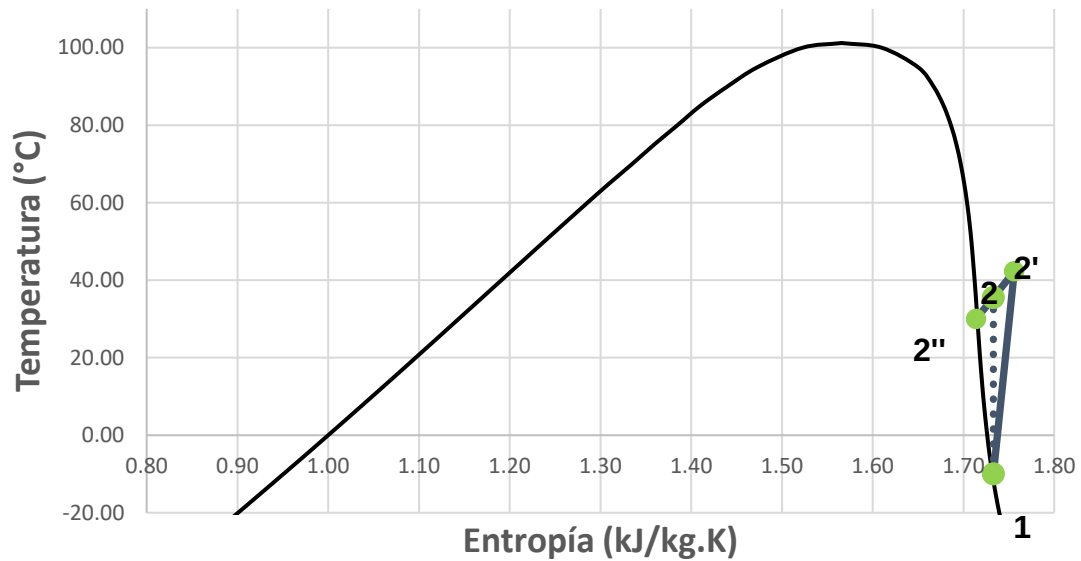
*Características termodinámicas del punto 2''*

| Punto | P(MPa) | T(°C) | h (kJ/kg) | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | s (kJ/kg.K) | X (%) | Estado                      |
|-------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------|-----------------------------|
| 1     | 0.2006 | -10   | 392.7     | 0.09959   | 372.7     | 1.733       | 100   | Vapor saturado              |
| 2     | 0.7702 | 35.49 | 420.6     | 0.02757   | 399.4     | 1.733       | -     | Vapor sobresaturado (ideal) |
| 2'    | 0.7702 | 42.28 | 427.575   | 0.02866   | 405.5     | 1.756       | -     | Vapor sobresaturado (real)  |
| 2''   | 0.7702 | 30    | 414.8     | 0.02664   | 394.3     | 1.714       | 100   | Vapor saturado              |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 21**

*Ubicación del punto 2'' en el diagrama T - s*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 22 se presenta la ubicación del punto 3 en el diagrama T – s, el cual representa el estado de líquido saturado en la salida del condensador. El valor de la presión se mantiene constante al valor del punto 2'', 0.7702 MPa, y el estado del refrigerante es líquido saturado. Para las condiciones mencionadas, se utilizará el CATT3 para determinar los demás valores que se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6**

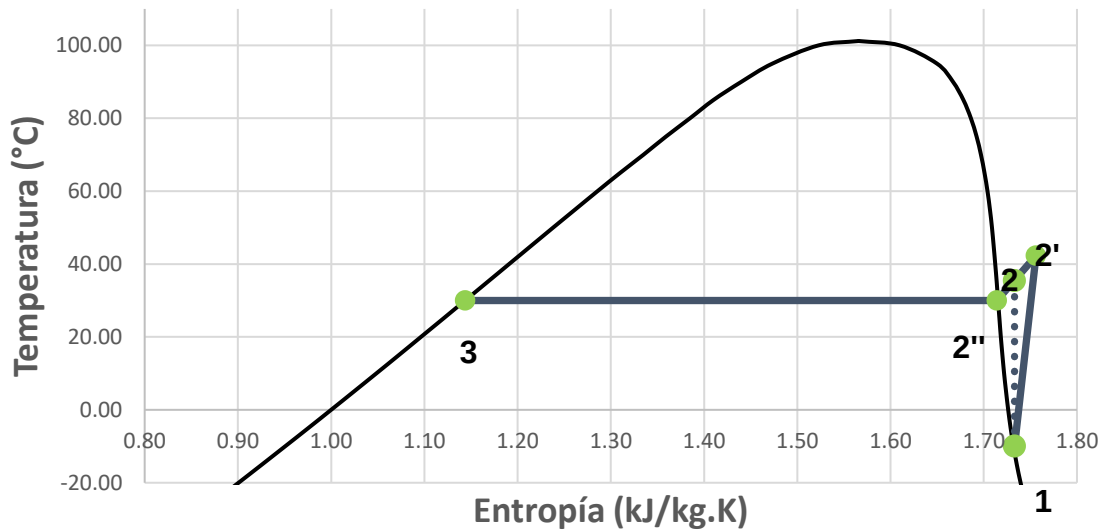
*Características termodinámicas del punto 3*

| Punto | P(MPa) | T(°C) | h<br>(kJ/kg) | v (m³/kg) | u<br>(kJ/kg) | s<br>(kJ/kg.K) | X (%) | Estado                         |
|-------|--------|-------|--------------|-----------|--------------|----------------|-------|--------------------------------|
| 1     | 0.2006 | -10   | 392.7        | 0.09959   | 372.7        | 1.733          | 100   | Vapor saturado                 |
| 2     | 0.7702 | 35.49 | 420.6        | 0.02757   | 399.4        | 1.733          | -     | Vapor sobresaturado<br>(ideal) |
| 2'    | 0.7702 | 42.28 | 427.575      | 0.02866   | 405.5        | 1.756          | -     | Vapor sobresaturado<br>(real)  |
| 2''   | 0.7702 | 30    | 414.8        | 0.02664   | 394.3        | 1.714          | 100   | Vapor saturado                 |
| 3     | 0.7702 | 30    | 241.7        | 0.000842  | 241.1        | 1.144          | 0     | Líquido saturado               |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 22**

*Ubicación del punto 3 en el diagrama T - s*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 23 se presenta la ubicación del punto 4 en el diagrama T – s, el cual representa el estado del refrigerante en la salida de la válvula de expansión. El valor de la entalpía se mantiene constante al valor del punto 3, 241.7 kJ/kg, y el valor de la presión es igual al del punto 1, 0.2006 MPa. Para las condiciones mencionadas, se utilizará el CATT3 para determinar los demás valores que se presentan en la tabla 7.

**Tabla 7**

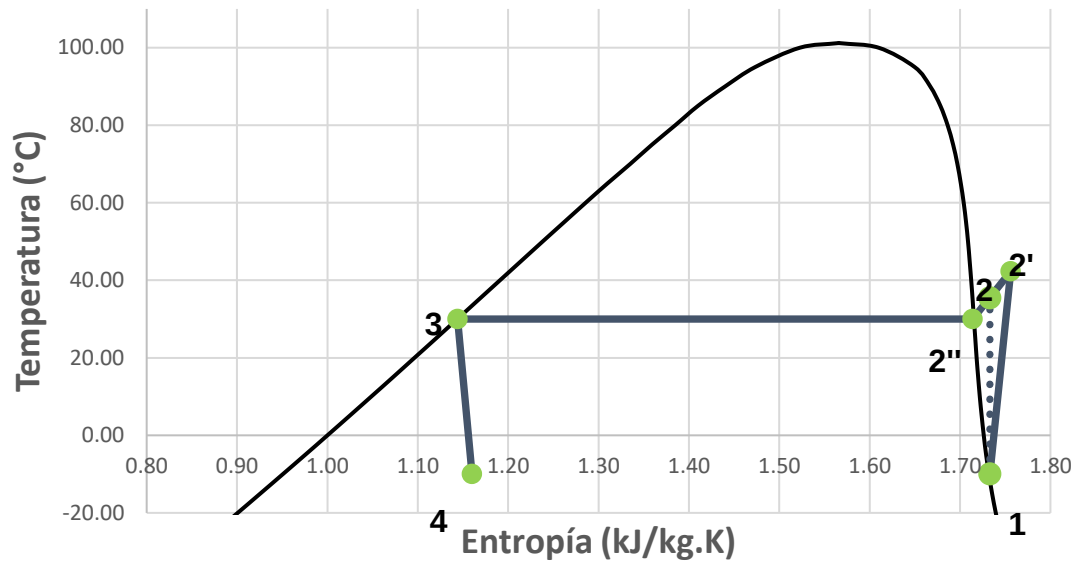
*Características termodinámicas del punto 4*

| Punto | P(MPa) | T(°C) | h (kJ/kg) | v (m³/kg) | u (kJ/kg) | s (kJ/kg.K) | X (%) | Estado                      |
|-------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------|-----------------------------|
| 1     | 0.2006 | -10   | 392.7     | 0.09959   | 372.7     | 1.733       | 100   | Vapor saturado              |
| 2     | 0.7702 | 35.49 | 420.6     | 0.02757   | 399.4     | 1.733       | -     | Vapor sobresaturado (ideal) |
| 2'    | 0.7702 | 42.28 | 427.575   | 0.02866   | 405.5     | 1.756       | -     | Vapor sobresaturado (real)  |
| 2''   | 0.7702 | 30    | 414.8     | 0.02664   | 394.3     | 1.714       | 100   | Vapor saturado              |
| 3     | 0.7702 | 30    | 241.7     | 0.000842  | 241.1     | 1.144       | 0     | Líquido saturado            |
| 4     | 0.2006 | -10   | 241.7     | 0.02716   | 236.3     | 1.16        | 26.72 | Estado líquido - vapor      |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 23**

*Ubicación del punto 4 en el diagrama T - s*

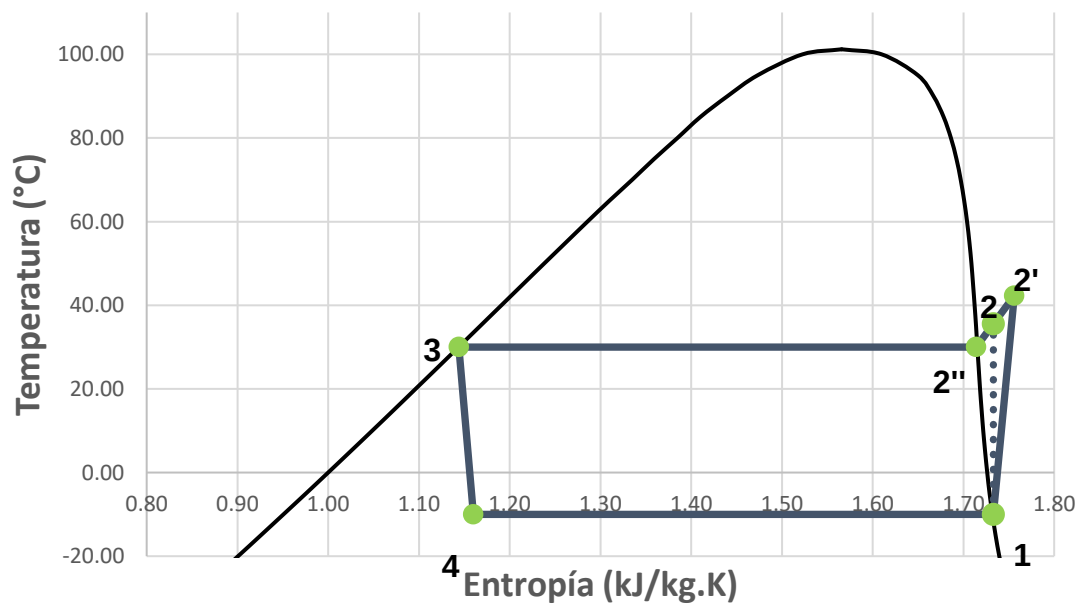


Nota. Fuente: (Elaboración propia)

Para completar el ciclo termodinámico del refrigerante, a continuación, en la figura 24 se presenta la gráfica con todos los puntos definidos.

**Figura 24**

*Representación del diagrama T - s del sistema de bomba de calor*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

Con todos los parámetros calculados en el ciclo termodinámico de la bomba de calor, se procede a calcular el calor transferido del condensador a la batería del vehículo.

Para determinar el calor transferido en la zona saturada del condensador, del punto 2'' al punto 3 en el diagrama T - s, se aplicará una correlación para determinar la entalpía convectiva, la cual será la ecuación de Chato:

$$\overline{h_D} = 0.555 * \left[ \frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * k_l^3 * h'_{fg}}{u_l * (T_{sat} - T_s) * D} \right]^{1/4}$$

El valor de  $h'_{fg}$ :

$$h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} * c_{p,l} * (T_{sat} - T_s)$$

Donde:

$\overline{h_D}$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección a condiciones medias de la superficie, W / m<sup>2</sup>.K

g: Aceleración gravitacional, considerar 9.81 m / s<sup>2</sup>

$\rho_l$ : Densidad de masa en condiciones de líquido saturado, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_v$ : Densidad de masa en condiciones de vapor saturado, kg/m<sup>3</sup>

$k_l$ : Conductividad térmica en condiciones de líquido saturado, W / m.K

$u_l$ : Viscosidad dinámica en condiciones de líquido saturado, kg/m.s

$T_{sat}$ : Temperatura en condiciones saturadas, K

$T_s$ : Temperatura en condiciones de la superficie, K

D: Diámetro interior del tubo, m

$h'_{fg}$ : Calor de vaporización modificado, J / kg



$h_{fg}$ : Calor latente de vaporización, J / kg

$c_{p,l}$ : Calor específico a presión constante en condiciones de líquido saturado, J / kg.K

Para obtener los valores de cada término de la ecuación de Chato, se utilizará la tabla de propiedades saturadas del refrigerante R134a del libro de Cengel, que se presenta en la tabla 8. En la zona saturada del condensador, la temperatura es 30 °C, y según el anexo 7, se tiene los siguientes valores:

**Tabla 8**

*Propiedades termodinámicas del R134a a 30°C*

| Tempe<br>ratura<br>T (°C) | Presión<br>saturada<br>P (kPa) | Densidad<br>(kg/m³) |           | Entalpía de<br>vaporización<br>h <sub>fg</sub> (kJ/kg) | Calor específico<br>C <sub>p</sub> (J/kg-K) |       | Conductividad<br>térmica K (W/m-K) |         | Viscosidad<br>dinámica (kg/m-<br>s) |            | Número<br>de Prant |           |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|------------------------------------|---------|-------------------------------------|------------|--------------------|-----------|
|                           |                                | Líqu<br>ido         | Va<br>por |                                                        | Líquido                                     | Vapor | Líquido                            | Vapor   | Líquid<br>o                         | Vapor      | Líqu<br>ido        | Va<br>por |
| 30                        | 770.6                          | 1188                | 37.53     | 173.1                                                  | 1448                                        | 1061  | 0.0808                             | 0.01507 | 0.0001888                           | 0.00001244 | 3.83               | 0.877     |

Nota. Fuente: Cengel, et al. (2014). "Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications"

De la tabla se obtienen los siguientes valores:

$$\rho_l: 1188 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_v: 37.53 \text{ kg/m}^3$$

$$k_l: 0.0808 \text{ W / m.K}$$

$$u_l: 0.0001888 \text{ kg/m.s}$$

$$T_{sat}: 303 \text{ K}$$

$$h_{fg}: 173.1 \text{ KJ / kg}$$

$$c_{p,l}: 1448 \text{ J / kg.K}$$

Para el diámetro interior del tubo, se considera un valor de 8.05 mm o 0.00805 m, debido a que está en el rango del catálogo del compresor que se ha tomado como referencia para la investigación.

$$D = 0.00805 \text{ m}$$

Para proceder con el cálculo del coeficiente convectivo, se debe conocer la temperatura de la superficie de la batería, que es igual a la temperatura del medio ambiente que se encuentra el vehículo, 0°C.

$$T_s = 0^\circ\text{C} = 273\text{K}$$

Con estos valores definidos, se procede a calcular el coeficiente convectivo:

$$\overline{h}_D = 0.555 * \left[ \frac{9.81 * 1188 * (1188 - 37.53) * 0.0808^3 * (173.1 + \frac{3}{8} * 1448 * (303 - 273))}{0.0001888 * (303 - 273) * 0.00805} \right]^{1/4}$$

$$\overline{h}_D = 1292.115 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

La fórmula es válida para velocidad bajas de vapor ( $u_{m,v}$ ), por lo cual se debe cumplir la siguiente ecuación en el interior del tubo:

$$Re_{v,i} = \left( \frac{\rho_v * u_{m,v} * D}{\mu_v} \right)_i < 35\,000$$

Reemplazando valores en base a la tabla 8:

$$\frac{37.53 * u_{m,v} * 0.00805}{0.00001244} < 35\,000$$

$$u_{m,v} < 1.441166 \text{ m/s}$$

Con el diámetro del tubo conocido, se calculará el caudal máximo:

$$\frac{u_{m,v} * \pi * D^2}{4} < \frac{1.441166 * \pi * (0.00805)^2}{4}$$

$$\text{Caudal} < 0.000073349 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ahora se determinará el flujo de masa que circula por el condensador:

$$\text{Caudal} * \rho_v < 0.000073349 * 37.53$$

$$\dot{m} < 0.0027528 \text{ kg/s}$$

El flujo de masa ( $\dot{m}$ ) no debe exceder ese valor, por lo cual se trabajará con el siguiente valor:

$$\dot{m} = 0.0027 \text{ kg/s} = 9.91 \text{ kg/h}$$

Una vez calculado el coeficiente convectivo y el flujo de masa, se calcula el calor transferido ( $q_c$ ) en la zona saturada del condensador con la siguiente ecuación:

$$q_c = \dot{m} * (h_{2''} - h_3)$$

Reemplazando valores:

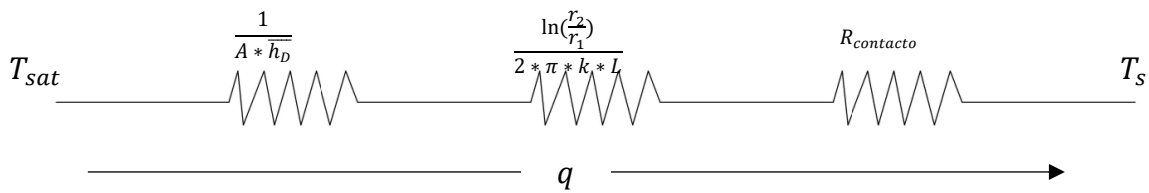
$$q_c = 0.0027 * (414.8 - 241.7)$$

$$q_c = 0.46737 \text{ kW} = 467.37 \text{ W}$$

Con el valor del calor transferido conocido, se determina la longitud del tubo en la zona saturada del condensador, y como se presenta en la figura 25, incluye el calor por conducción, calor por convección y la resistencia de contacto entre la superficie la batería y la superficie del tubo:

**Figura 25**

*Diagrama de resistencias*



Nota. Fuente: (Elaboración propia)

$$q_c = \frac{T_{sat} - T_s}{R_{contacto} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2 * \pi * k * L} + \frac{1}{A * h_D}}$$

Donde:

$T_{sat}$ : Temperatura en condiciones saturadas, K

$T_s$ : Temperatura en condiciones de la superficie, K

$R_{contacto}$ : Resistencia de contacto, K/W

$r_2$ : Radio exterior, m

$r_1$ : Radio interior, m

$\pi$ : Coeficiente Pi

$k$ : Conductividad térmica, W/m.K

$L$ : Longitud del condensador, m

$A$ : Área convectiva, m<sup>2</sup>

$\overline{h_D}$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección condiciones medias de la superficie, W / m<sup>2</sup>.K

Para simplificar la ecuación, se considera mínimo el calor perdido por el espesor del tubo, debido a que el valor del radio interior,  $r_1$ , y del radio exterior,  $r_2$ , son casi idénticos. En el caso de la resistencia de contacto, se considera el uso de una pasta térmica entre las superficies de contacto para reducir este valor y por ende, el valor de la resistencia de contacto será despreciable.

Por lo tanto, la ecuación se reduce a:

$$q_c = \frac{T_{sat} - T_s}{\frac{1}{A * \overline{h_D}}}$$

Reemplazando valores:

$$467.37 = \frac{303 - 273}{\frac{1}{L * \pi * 0.00805 * 1292.115}}$$
$$L = 0.476752 \text{ m}$$

Este es el valor de la longitud requerida del tubo para la zona saturada en el condensador para transferir el calor calculado. Para la potencia del compresor ( $\dot{W}_C$ ), con el valor del flujo másico conocido, se calcula la potencia:

$$\dot{W}_C = \dot{m} * (h_{2'} - h_1)$$

$$\dot{W}_C = 0.0027 * (427.575 - 392.7) * 1000$$

$$\dot{W}_C = 59.67 \text{ W}$$

Se procederá a calcular el calor transferido del estado de vapor sobrecalentado (2') a vapor saturado (2''), con el flujo de masa calculado previamente. En este caso, para utilizar las correlaciones y hallar el coeficiente convectivo, se calculará previamente el número de Reynolds.

$$Re = \frac{4 * \dot{m}}{u * \pi * D}$$

Reemplazando valores:

$$Re = \frac{4 * 0.0027}{0.00001244 * \pi * 0.00805}$$

$$Re = 34328.7209 > 4000$$

Debido a que el número de Reynold es mayor a 4000, el flujo es turbulento. Entre las diversas ecuaciones que existen para calcular el coeficiente convectivo, se analizarán dos casos con diferentes ecuaciones que cumplan con las condiciones del problema, para posteriormente seleccionar el mejor de los casos.

### **Caso I**

Para el análisis del caso, previamente se debe calcular la constante de fricción ( $f$ ).

$$f = (0.79 * \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$

Reemplazando valores:

$$f = (0.79 * \ln(34328.7209) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.02288361$$

Se procede a calcular el número de Nussell ( $Nu$ ) mediante la siguiente ecuación, que incluye el Número de Prant ( $Pr$ ), cuyo valor se obtiene de la tabla 8, el cual es 0.877.

$$Nu = 0.125 * f * Re * Pr^{1/3}$$

Reemplazando valores:

$$Nu = 0.125 * 0.02288361 * 34\,328.7209 * 0.877^{1/3}$$

$$Nu = 93.99223$$

Para determinar el coeficiente convectivo se utilizará la siguiente ecuación:

$$h = \frac{Nu * K}{D}$$

Reemplazando valores:

$$h = \frac{93.99223 * 0.01507}{0.00805}$$

$$h = 175.958125 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

Para determinar el calor transferido, se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = \frac{T_{2'} - T_b}{\frac{1}{D * l * \pi * h}}$$

Donde la longitud “l” se refiere a la longitud del tramo previo a la zona saturada en el condensador, esto debido a que el fluido se encuentra en otra fase.

Para el cálculo del calor transferido entre 2' y 2'', se utilizará la siguiente fórmula:

$$q = \dot{m} * (h_{2'} - h_{2''})$$

$$q = 0.0027 * (427.575 - 414.8)$$

$$q = 34.4925 \text{ W}$$

El valor del calor calculado debe ser equivalente al valor del calor transferido con el coeficiente convectivo.

$$q = \frac{T_{2'} - T_b}{\frac{1}{D * l * \pi * h}} = 34.4925 \text{ W}$$

$$q = \frac{42.28 - 0}{\frac{1}{0.00805 * l * \pi * 175.958125}} = 34.4925 \text{ W}$$

$$l = 0.18333 \text{ m}$$

## **Caso II**

El número de Reynolds calculado en el caso I no varía, por lo que se mantiene constante su valor. Sin embargo, para el cálculo del Nussell, se procede a usar la siguiente ecuación:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

Reemplazando valores:

$$Nu = 0.023 * 34\,328.7209^{0.8} * 0.877^{0.4}$$

$$Nu = 92.77987$$

Se calcula el coeficiente convectivo:

$$h = \frac{Nu * K}{D}$$

Reemplazando valores:

$$h = \frac{92.77987 * 0.01507}{0.00805}$$

$$h = 173.6885 \text{ W/m}^2.K$$

De manera similar al caso anterior, el calor transferido será igual al calculado termodinámicamente, por lo que solo varía la longitud del tramo.

$$q = \frac{T_{2'} - T_b}{\frac{1}{D * l * \pi * h}} = 34.4925 \text{ W}$$

$$q = \frac{42.28 - 0}{\frac{1}{0.00805 * l * \pi * 173.6885}} = 34.4925 \text{ W}$$

$$l = 0.185726 \text{ m}$$

Para decidir cuál de los dos casos se utilizará, se escogerá el de mayor valor de la longitud “l”, el cual es el caso II con un valor de la longitud igual a 0.185726 m.

Para calcular el calor total trasferido en el condensador, desde la salida del compresor hasta la entrada de la válvula de expansión (desde el punto 2’ al punto 3) se debe sumar los dos valores de los calores calculados previamente.

$$Q = q_c + q = 467.37 + 34.4925$$

$$Q = q_c + q = 501.8625 \text{ W}$$

Conocido el valor del calor transferido, se realiza una estimación del tiempo para la temperatura final de la batería. Como se ha mencionado anteriormente, la temperatura máxima será 15°C, ya que el rango de recorrido no disminuye en exceso, y para el análisis, se considerará una variación de la temperatura de la batería en 0.5°C, debido a que mayor temperatura de la batería, menor será el calor transferido, y para tener una medición más exacta del tiempo que requeriría la batería para aumentar su temperatura, se considera el intervalo de 0.5°C. Para determinar el tiempo, se emplea la siguiente ecuación.

$$\frac{dU}{dt} = V * \rho * Cp * \frac{dT_b}{dt} = Q$$

Como la variación de temperatura entre la temperatura inicial y final de la batería es relativamente menor, 0.5°C, se asume una variación lineal en la ecuación, por lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$V * \rho * Cp * \frac{\Delta T_b}{\Delta t} = Q$$

Donde:

V: Volumen de la batería, m<sup>3</sup>



$\rho$ : Densidad de la batería, kg / m<sup>3</sup>

$C_p$ : Calor específico de la batería, J/kg.K

$\Delta T_b$ : Variación de temperatura en la batería, K

$t$ : Variación del tiempo, s

Para el valor del volumen de la batería, de acuerdo con la información del Anexo 4, los valores de las dimensiones son:

Longitud: 1.547 m

Ancho: 1.188 m

Espesor: 0.264 m

El volumen externo se obtiene de la multiplicación de los factores:

$$V = 1.547 * 1.188 * 0.264 = 0.4851887 \text{ m}^3$$

Para el valor de la densidad de la batería, se considera el valor de acuerdo con Kalogiannis et al. (2019), y para el valor del calor específico, se considera el valor de acuerdo con Li et al. (2014).

$$\rho = 2247 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1000 \text{ J/kg.K}$$

Se procede a calcular el tiempo.

$$0.4851887 * 2247 * 1000 * \frac{0.5}{\Delta t} = 501.8625$$

$$\Delta t = 1086.173 \text{ s}$$

$$\Delta t = 18.1 \text{ min}$$

Para calentar la temperatura de la batería de 0°C a 0.5°C, en base a las condiciones asumidas, el tiempo estimado es de 18 minutos aproximadamente. En la tabla 5.8 se elabora una tabla resumen con una variación de la temperatura de la batería

incrementando en  $0.5^{\circ}\text{C}$ , para determinar el tiempo que le tomaría al sistema de bomba de calor elevar la temperatura de la batería de  $0^{\circ}\text{C}$  hasta los  $15^{\circ}\text{C}$ . Además, el calor transferido del sistema de bomba de calor a la batería disminuirá cuando la temperatura de la batería aumenta, porque el valor de la diferencia entre las temperaturas disminuye ( $30^{\circ}\text{C}$  en el condensador, con la temperatura de la batería incrementada). Cabe destacar que la longitud del tubo en el condensador no varía.

En el caso de la longitud del tramo en el evaporador, el cálculo es muy complejo por la razón de que el fluido se calienta de líquido saturado a vapor saturado, y no existe una correlación directa que determine la transferencia de calor, como sí es en el caso del proceso inverso, de vapor saturado a líquido saturado.

En la tabla 9, la temperatura inicial ( $T_o$ ) de la batería es  $0^{\circ}\text{C}$  en el inicio del análisis, y como la variación de la temperatura ( $T_f - T_o$ ) es  $0.5^{\circ}\text{C}$ , la temperatura final ( $T_f$ ) es  $0.5^{\circ}\text{C}$  en el primer análisis. La entalpía convectiva calculada por la ecuación de Chato ( $h_D$ ) variará su valor debido al cambio de valor de  $T_o$ , y según la metodología desarrollada en la investigación, se determinará los siguientes parámetros para diferentes valores de  $T_o$ : calor transferido en la zona saturada del condensador ( $q_c$ ), potencia del compresor ( $\dot{W}_c$ ), calor total transferido del condensador ( $Q$ ), tiempo en minutos ( $t$ ) y tiempo acumulado ( $T$ ).

**Tabla 9**

*Tabla resumen*

| $T_o$ (°C) | $T_f$ (°C) | $T_f - T_o$ (°C) | $h_b$ (W/m <sup>2</sup> .K) | $q_c$ (W) | $\dot{W}_c$ (W) | $q$ (W) | $Q$ (W) | $t$ (min) | $T$ (min) |
|------------|------------|------------------|-----------------------------|-----------|-----------------|---------|---------|-----------|-----------|
| 0          | 0.5        | 0.5              | 1292.12                     | 467.37    | 59.67           | 34.49   | 501.86  | 18.10     | 18.10     |
| 0.5        | 1          | 0.5              | 1297.09                     | 461.35    | 58.90           | 34.05   | 495.40  | 18.34     | 36.44     |
| 1          | 1.5        | 0.5              | 1302.18                     | 455.31    | 58.13           | 33.60   | 488.91  | 18.58     | 55.02     |
| 1.5        | 2          | 0.5              | 1307.38                     | 449.25    | 57.36           | 33.16   | 482.40  | 18.83     | 73.86     |
| 2          | 2.5        | 0.5              | 1312.71                     | 443.16    | 56.58           | 32.71   | 475.87  | 19.09     | 92.95     |
| 2.5        | 3          | 0.5              | 1318.16                     | 437.06    | 55.80           | 32.26   | 469.31  | 19.36     | 112.30    |
| 3          | 3.5        | 0.5              | 1323.74                     | 430.93    | 55.02           | 31.80   | 462.73  | 19.63     | 131.90    |
| 3.5        | 4          | 0.5              | 1329.46                     | 424.78    | 54.23           | 31.35   | 456.12  | 19.92     | 151.90    |
| 4          | 4.5        | 0.5              | 1335.32                     | 418.60    | 53.44           | 30.89   | 449.49  | 20.21     | 172.10    |
| 4.5        | 5          | 0.5              | 1341.33                     | 412.40    | 52.65           | 30.44   | 442.83  | 20.52     | 192.60    |
| 5          | 5.5        | 0.5              | 1347.50                     | 406.17    | 51.86           | 29.98   | 436.15  | 20.83     | 213.40    |
| 5.5        | 6          | 0.5              | 1353.83                     | 399.92    | 51.06           | 29.51   | 429.43  | 21.16     | 234.60    |
| 6          | 6.5        | 0.5              | 1360.33                     | 393.64    | 50.26           | 29.05   | 422.69  | 21.49     | 256.10    |
| 6.5        | 7          | 0.5              | 1367.01                     | 387.33    | 49.45           | 28.59   | 415.91  | 21.84     | 277.90    |
| 7          | 7.5        | 0.5              | 1373.88                     | 380.99    | 48.64           | 28.12   | 409.11  | 22.21     | 300.10    |
| 7.5        | 8          | 0.5              | 1380.94                     | 374.62    | 47.83           | 27.65   | 402.27  | 22.58     | 322.70    |
| 8          | 8.5        | 0.5              | 1388.21                     | 368.23    | 47.01           | 27.18   | 395.40  | 22.98     | 345.70    |
| 8.5        | 9          | 0.5              | 1395.70                     | 361.80    | 46.19           | 26.70   | 388.50  | 23.39     | 369.10    |
| 9          | 9.5        | 0.5              | 1403.42                     | 355.34    | 45.37           | 26.22   | 381.57  | 23.81     | 392.90    |
| 9.5        | 10         | 0.5              | 1411.38                     | 348.85    | 44.54           | 25.75   | 374.59  | 24.25     | 417.10    |
| 10         | 10.5       | 0.5              | 1419.60                     | 342.32    | 43.70           | 25.26   | 367.59  | 24.72     | 441.80    |
| 10.5       | 11         | 0.5              | 1428.09                     | 335.76    | 42.87           | 24.78   | 360.54  | 25.20     | 467.00    |
| 11         | 11.5       | 0.5              | 1436.86                     | 329.16    | 42.02           | 24.29   | 353.45  | 25.70     | 492.70    |
| 11.5       | 12         | 0.5              | 1445.93                     | 322.52    | 41.18           | 23.80   | 346.32  | 26.23     | 519.00    |
| 12         | 12.5       | 0.5              | 1455.33                     | 315.84    | 40.32           | 23.31   | 339.15  | 26.79     | 545.80    |
| 12.5       | 13         | 0.5              | 1465.07                     | 309.13    | 39.47           | 22.81   | 331.94  | 27.37     | 573.10    |
| 13         | 13.5       | 0.5              | 1475.18                     | 302.37    | 38.60           | 22.31   | 324.68  | 27.98     | 601.10    |
| 13.5       | 14         | 0.5              | 1485.68                     | 295.56    | 37.73           | 21.81   | 317.37  | 28.63     | 629.70    |
| 14         | 14.5       | 0.5              | 1496.59                     | 288.71    | 36.86           | 21.31   | 310.02  | 29.31     | 659.10    |
| 14.5       | 15         | 0.5              | 1507.95                     | 281.81    | 35.98           | 20.80   | 302.61  | 30.02     | 689.10    |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

## **CAPÍTULO IV. Resultados, Contratación de Hipótesis y Discusión Resultados**

Se analizará los resultados que se han obtenido del capítulo III a través de unas gráficas elaboradas en el software Excel, lo cual permitirá comparar cómo varían ciertos parámetros importantes en la temperatura de la batería.

### **4.1 Análisis de los resultados obtenidos respecto con la temperatura de la batería**

En la tabla 9, el tiempo calculado para calentar la temperatura de la batería de 0°C a 15°C es superior a 11 horas, lo cual no resulta práctico para el usuario del vehículo eléctrico esperar tantas horas. Debido a esto, se analiza instalar más de una bomba de calor en el sistema, las cuales irían distribuidas en la parte inferior del vehículo eléctrico.

En la figura 26 a la figura 29, se presenta la distribución del sistema de bomba de calor con diferente número de bombas de calor. El número máximo escogido es cuatro debido al ancho de la batería y el ancho de cada compresor. Cada bomba de calor trabajará independientemente, por lo que los valores calculados en la tabla 9 son los mismos para cada bomba de calor, a excepción del tiempo. El tiempo será reducido proporcionalmente al número de bombas que sean utilizadas, como se presenta en la tabla 10.

En la tabla 10 se presenta los valores del trabajo del compresor, calor total transferido del condensador y el tiempo, para cada sistema con diferente número de bombas de calor. En el primer grupo, representado de la cuarta a la sexta columna, los valores para el sistema de una sola bomba de calor; el segundo grupo, representado de la séptima a la novena columna, es para el sistema de dos bombas de calor; el tercer grupo, representado de la décima a la duodécima columna, es para el sistema de tres bombas de calor; y el cuarto grupo, representado por las últimas tres columnas, es para el sistema de cuatro bombas de calor.

**Tabla 10**

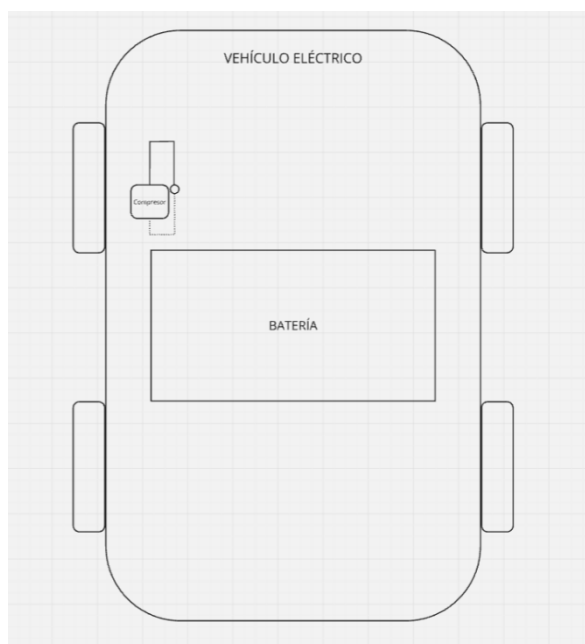
*Tabla resumen para los sistemas con diferentes números de bomba de calor*

| To (°C) | Tf (°C) | Tf - To (°C) | Wc1 (W) | Q1 (W) | T1 (min) | Wc2 (W) | Q2 (W)  | T2 (min) | Wc3 (W) | Q3 (W)  | T3 (min) | Wc4 (W) | Q4 (W)  | T4 (min) |
|---------|---------|--------------|---------|--------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 0       | 0.5     | 0.5          | 59.67   | 501.86 | 18.10    | 119.34  | 1003.73 | 9.05     | 179.01  | 1505.59 | 6.03     | 238.68  | 2007.45 | 4.53     |
| 0.5     | 1       | 0.5          | 58.90   | 495.40 | 36.44    | 117.80  | 990.80  | 18.22    | 176.70  | 1486.20 | 12.15    | 235.61  | 1981.59 | 9.11     |
| 1       | 1.5     | 0.5          | 58.13   | 488.91 | 55.02    | 116.26  | 977.82  | 27.51    | 174.39  | 1466.74 | 18.34    | 232.52  | 1955.65 | 13.76    |
| 1.5     | 2       | 0.5          | 57.36   | 482.40 | 73.86    | 114.71  | 964.80  | 36.93    | 172.07  | 1447.21 | 24.62    | 229.43  | 1929.61 | 18.46    |
| 2       | 2.5     | 0.5          | 56.58   | 475.87 | 92.95    | 113.16  | 951.74  | 46.47    | 169.74  | 1427.61 | 30.98    | 226.32  | 1903.48 | 23.24    |
| 2.5     | 3       | 0.5          | 55.80   | 469.31 | 112.31   | 111.60  | 938.63  | 56.15    | 167.40  | 1407.94 | 37.44    | 223.20  | 1877.25 | 28.08    |
| 3       | 3.5     | 0.5          | 55.02   | 462.73 | 131.94   | 110.03  | 925.46  | 65.97    | 165.05  | 1388.19 | 43.98    | 220.07  | 1850.92 | 32.99    |
| 3.5     | 4       | 0.5          | 54.23   | 456.12 | 151.86   | 108.46  | 912.25  | 75.93    | 162.70  | 1368.37 | 50.62    | 216.93  | 1824.50 | 37.96    |
| 4       | 4.5     | 0.5          | 53.44   | 449.49 | 172.07   | 106.89  | 898.98  | 86.04    | 160.33  | 1348.47 | 57.36    | 213.77  | 1797.97 | 43.02    |
| 4.5     | 5       | 0.5          | 52.65   | 442.83 | 192.59   | 105.30  | 885.66  | 96.29    | 157.95  | 1328.50 | 64.20    | 210.61  | 1771.33 | 48.15    |
| 5       | 5.5     | 0.5          | 51.86   | 436.15 | 213.42   | 103.71  | 872.29  | 106.71   | 155.57  | 1308.44 | 71.14    | 207.43  | 1744.58 | 53.35    |
| 5.5     | 6       | 0.5          | 51.06   | 429.43 | 234.57   | 102.12  | 858.86  | 117.29   | 153.17  | 1288.29 | 78.19    | 204.23  | 1717.72 | 58.64    |
| 6       | 6.5     | 0.5          | 50.26   | 422.69 | 256.07   | 100.51  | 845.37  | 128.03   | 150.77  | 1268.06 | 85.36    | 201.02  | 1690.75 | 64.02    |
| 6.5     | 7       | 0.5          | 49.45   | 415.91 | 277.91   | 98.90   | 831.83  | 138.96   | 148.35  | 1247.74 | 92.64    | 197.80  | 1663.65 | 69.48    |
| 7       | 7.5     | 0.5          | 48.64   | 409.11 | 300.12   | 97.28   | 818.22  | 150.06   | 145.93  | 1227.33 | 100.04   | 194.57  | 1636.43 | 75.03    |
| 7.5     | 8       | 0.5          | 47.83   | 402.27 | 322.70   | 95.66   | 804.55  | 161.35   | 143.49  | 1206.82 | 107.57   | 191.32  | 1609.09 | 80.68    |
| 8       | 8.5     | 0.5          | 47.01   | 395.40 | 345.68   | 94.02   | 790.81  | 172.84   | 141.04  | 1186.21 | 115.23   | 188.05  | 1581.62 | 86.42    |
| 8.5     | 9       | 0.5          | 46.19   | 388.50 | 369.07   | 92.38   | 777.01  | 184.53   | 138.58  | 1165.51 | 123.02   | 184.77  | 1554.01 | 92.27    |
| 9       | 9.5     | 0.5          | 45.37   | 381.57 | 392.88   | 90.73   | 763.13  | 196.44   | 136.10  | 1144.70 | 130.96   | 181.47  | 1526.26 | 98.22    |
| 9.5     | 10      | 0.5          | 44.54   | 374.59 | 417.13   | 89.08   | 749.19  | 208.56   | 133.61  | 1123.78 | 139.04   | 178.15  | 1498.38 | 104.28   |
| 10      | 10.5    | 0.5          | 43.70   | 367.59 | 441.85   | 87.41   | 735.17  | 220.92   | 131.11  | 1102.76 | 147.28   | 174.82  | 1470.34 | 110.46   |
| 10.5    | 11      | 0.5          | 42.87   | 360.54 | 467.04   | 85.73   | 721.08  | 233.52   | 128.60  | 1081.61 | 155.68   | 171.47  | 1442.15 | 116.76   |
| 11      | 11.5    | 0.5          | 42.02   | 353.45 | 492.75   | 84.05   | 706.90  | 246.37   | 126.07  | 1060.35 | 164.25   | 168.10  | 1413.81 | 123.19   |
| 11.5    | 12      | 0.5          | 41.18   | 346.32 | 518.98   | 82.35   | 692.65  | 259.49   | 123.53  | 1038.97 | 172.99   | 164.71  | 1385.30 | 129.75   |
| 12      | 12.5    | 0.5          | 40.32   | 339.15 | 545.77   | 80.65   | 678.31  | 272.88   | 120.97  | 1017.46 | 181.92   | 161.30  | 1356.62 | 136.44   |
| 12.5    | 13      | 0.5          | 39.47   | 331.94 | 573.14   | 78.93   | 663.88  | 286.57   | 118.40  | 995.82  | 191.05   | 157.87  | 1327.76 | 143.28   |
| 13      | 13.5    | 0.5          | 38.60   | 324.68 | 601.12   | 77.21   | 649.36  | 300.56   | 115.81  | 974.04  | 200.37   | 154.41  | 1298.72 | 150.28   |
| 13.5    | 14      | 0.5          | 37.73   | 317.37 | 629.75   | 75.47   | 634.75  | 314.87   | 113.20  | 952.12  | 209.92   | 150.94  | 1269.49 | 157.44   |
| 14      | 14.5    | 0.5          | 36.86   | 310.02 | 659.05   | 73.72   | 620.03  | 329.53   | 110.58  | 930.05  | 219.68   | 147.44  | 1240.07 | 164.76   |
| 14.5    | 15      | 0.5          | 35.98   | 302.61 | 689.08   | 71.96   | 605.22  | 344.54   | 107.94  | 907.83  | 229.69   | 143.92  | 1210.44 | 172.27   |

Nota. Fuente: (Elaboración propia)

**Figura 26**

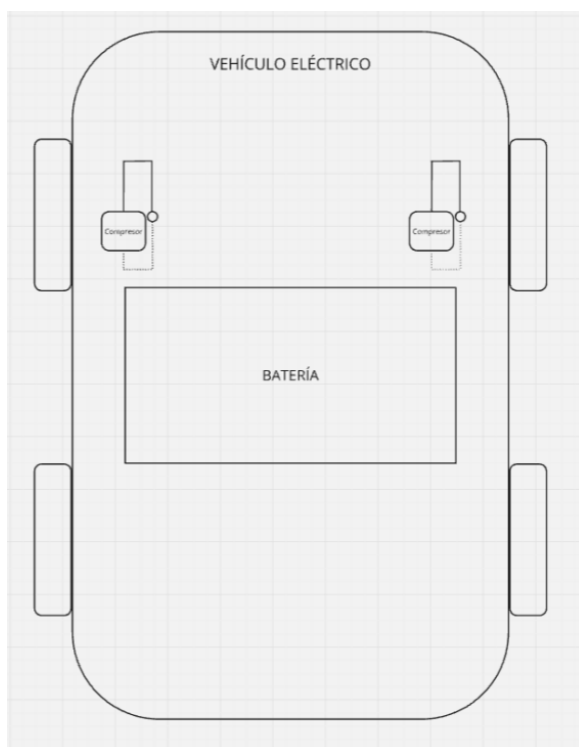
*Diagrama de la ubicación del sistema con una bomba de calor.*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 27**

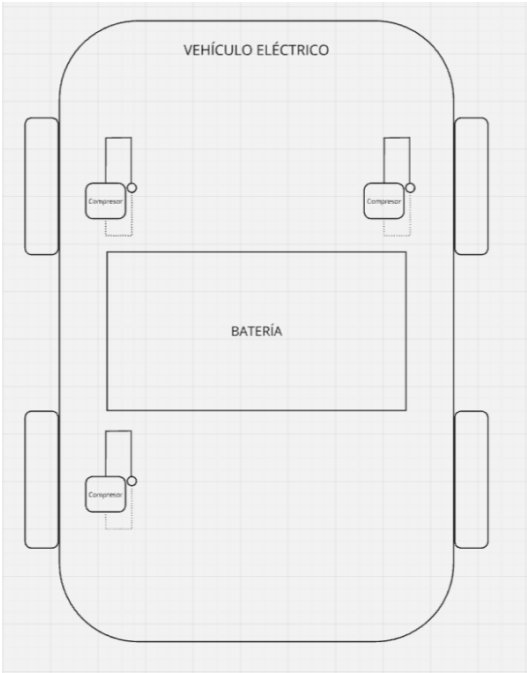
*Diagrama de la ubicación del sistema con dos bombas de calor.*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 28**

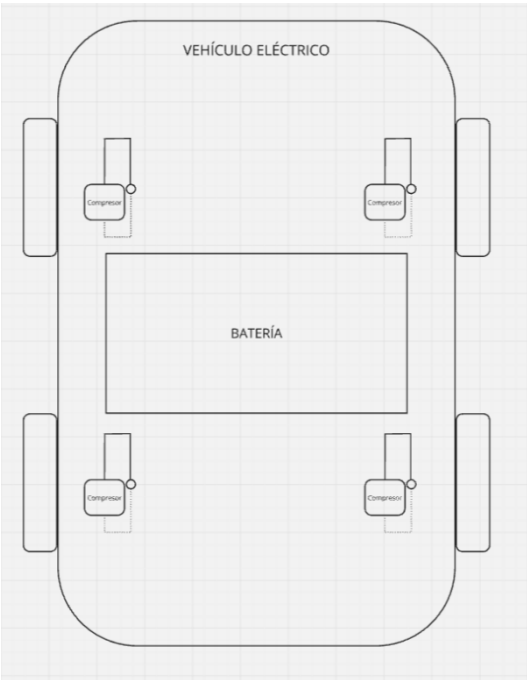
*Diagrama de la ubicación del sistema con tres bombas de calor.*



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 29**

*Diagrama de la ubicación del sistema con cuatro bombas de calor.*



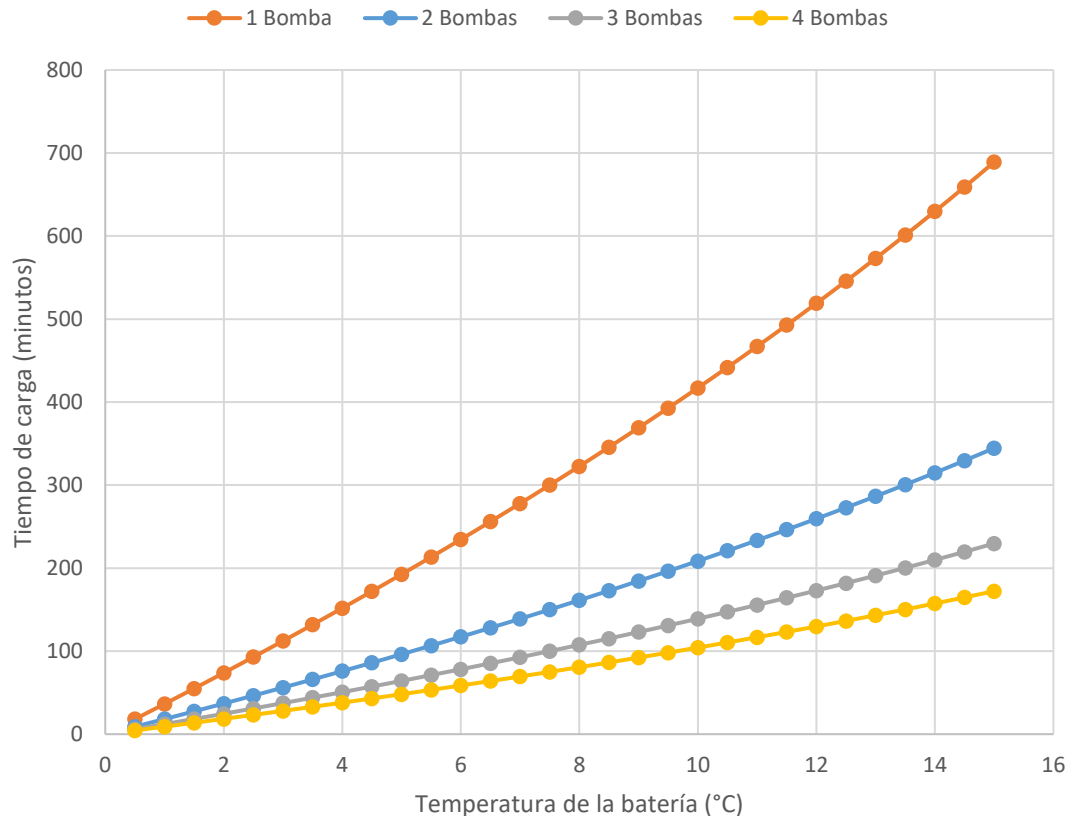
Nota. Fuente: Elaboración propia

En la figura 30 se presenta la variación del tiempo para los sistemas con diferente número de bombas de calor que necesitan para calentar la batería hasta la temperatura de 15°C. El tiempo requerido si se utiliza una bomba de calor sería de 689.07 minutos, superior a las 11 horas. En el caso de dos bombas de calor, el tiempo se reduce a la mitad, 344.53 minutos o seis horas aproximadamente. En el caso de tres bombas de calor, el tiempo será de 229.69 minutos o aproximadamente cuatro horas. En el caso de utilizar cuatro bombas, el tiempo será de 172.68 minutos o aproximadamente tres horas.

Como se ha mencionado previamente, el sistema funcionaría mientras el vehículo se encuentra en reposo, recargando la batería y una vez que se desconecte el sistema de bomba de calor para que el vehículo eléctrico se desplace, la autonomía de la batería habrá aumentado.

**Figura 30**

*Gráfica Temperatura de la batería vs Tiempo de carga.*



Nota. Fuente: Elaboración propia



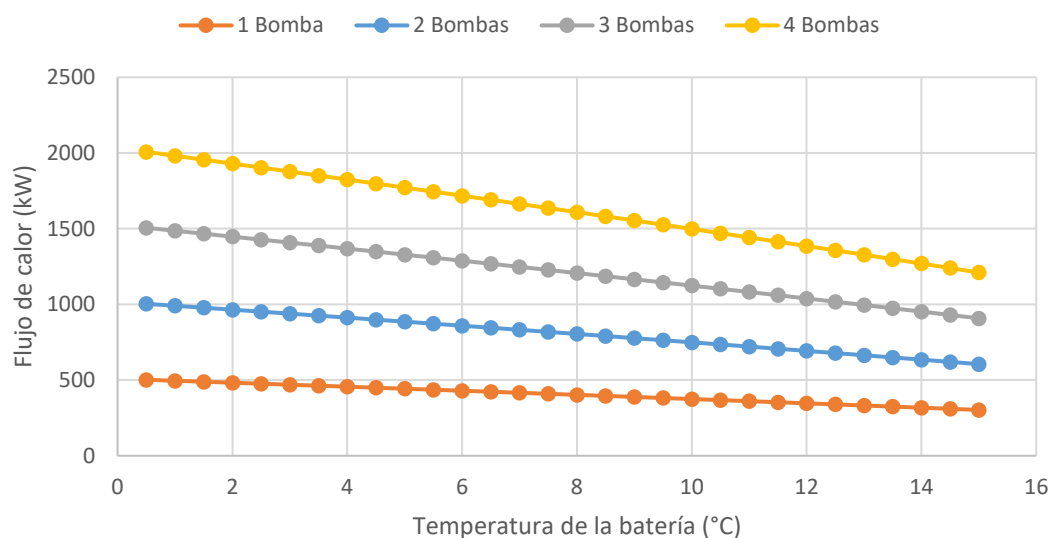
Respecto a la transferencia de calor del sistema de bomba de calor a la batería, en la figura 31 se presenta como varía el calor transferido respecto de la temperatura de la batería deseada. El calor transferido es menor cuando la temperatura de la batería es mayor debido a que mayor temperatura de la batería, la diferencia con la temperatura del condensador (30°C) será menor. Por lo tanto, y similar al caso anterior, dependerá de la necesidad del conductor cuánto será el valor de la transferencia de calor del sistema de bomba de calor a la batería.

En el sistema con una bomba de calor, el calor transferido varía en un rango de 501.86 W a 302.61 W, lo cual representa una disminución del calor transferido en 40%. A mayor cantidad del número de bombas de calor, el flujo de calor transferido será proporcional. Por lo que cuando se utiliza cuatro bombas de calor, el calor transferido varía en un rango de 2007.45 W a 1210.43 W.

Respecto a la transferencia de calor del medio ambiente al sistema a través del evaporador, como ya se mencionó en el capítulo anterior, no se determinó debido a la complejidad para obtener el valor de la constante de entalpía.

**Figura 31**

*Gráfica Temperatura de la batería vs Flujo de calor*



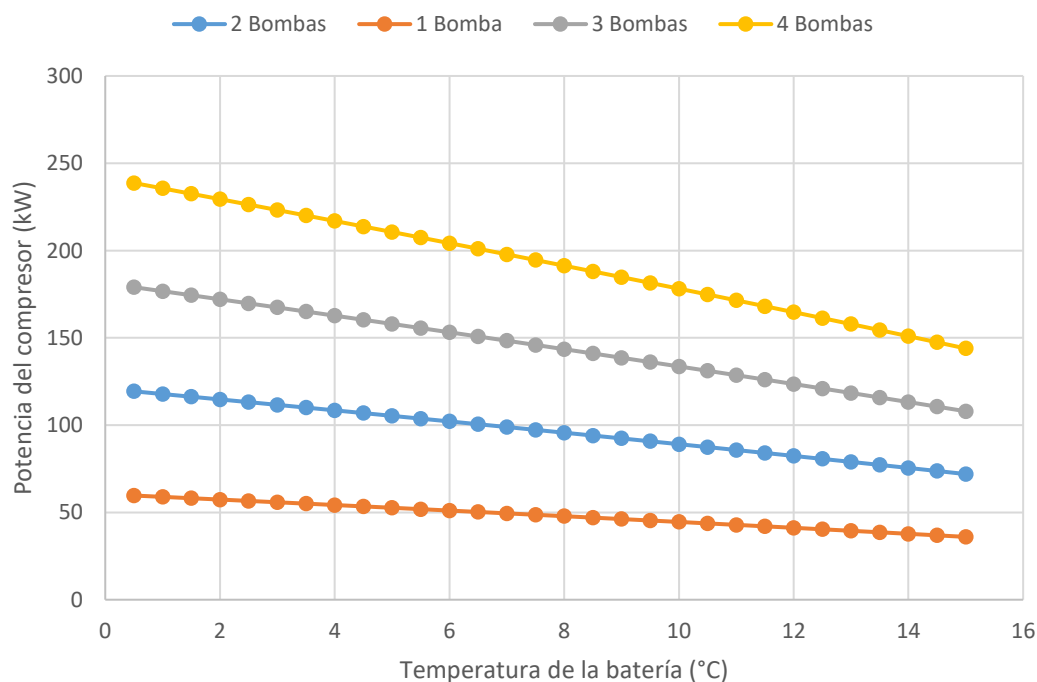
Nota. Fuente: Elaboración propia

En la figura 32 se presenta la gráfica de la potencia del compresor o de los compresores, dependiendo del número de bombas de calor a utilizar en el sistema, respecto de la temperatura de la batería. A mayor temperatura, menor será el valor de la transferencia de calor, por lo que la potencia del compresor será menor.

En el caso del sistema con una bomba de calor, será utilizado un compresor, y la potencia requerida para que opere varía en el rango de 59.67 W a 35.97 W. Por cada bomba de calor adicionada al sistema, le corresponderá un compresor, con su respectivo condensador y evaporador, ya que cada sistema opera independientemente. Por lo cual, la potencia de los compresores para los sistemas con dos, tres y cuatro bombas de calor, equivale al mismo valor del sistema con una bomba de calor, pero como conjunto, se multiplicará por la cantidad de bombas de calor. Para el sistema con cuatro bombas de calor, la potencia requerida por cada compresor varía en el rango de 59.67 W a 35.97 W, y como conjunto, varía de 238.68 W a 143.91 W.

**Figura 32**

*Gráfica Temperatura de la batería vs Flujo de masa*



Nota. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se presenta la información sobre el rango de recorrido, en porcentaje, respecto de la temperatura del medio ambiente, para una velocidad de 30 km/h, en base a un estudio realizado con diversos vehículos eléctricos para conocer en cuanto influye el cambio de la temperatura del medio ambiente en la distancia de recorrido. (Argue, 2023)

**Tabla 11**

*Rango de autonomía a diferentes temperaturas de la batería*

| Temperatura del Medio Ambiente (°C) | Rango de la Batería (%) |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 20                                  | 100                     |
| 15                                  | 85.5                    |
| 14                                  | 83.1                    |
| 13                                  | 80.8                    |
| 12                                  | 78.5                    |
| 11                                  | 76.6                    |
| 10                                  | 74.7                    |
| 9                                   | 72.7                    |
| 8                                   | 71                      |
| 7                                   | 69.4                    |
| 6                                   | 67.7                    |
| 5                                   | 66.3                    |
| 4                                   | 64.8                    |
| 3                                   | 63.4                    |
| 2                                   | 62.1                    |
| 1                                   | 60.8                    |
| 0                                   | 59.5                    |

Nota. Fuente: GeoTab

En base a la información de la tabla 11, se estima que, a una temperatura de 20°C, la batería opera a su máximo recorrido de distancia, a una velocidad de 30 km/h. Para una temperatura igual a 0°C, el rango de recorrido disminuye 59.5 % de la capacidad original, poco más del 40%, y para una temperatura igual a 15°C, se reduce a 85%, por lo cual la diferencia es menor comparado con la temperatura anterior.

En la tabla 11, las temperaturas entre 0°C y 15°C varían en intervalos de 1°C, para tener una mejor compresión de cuánto se recuperará del recorrido del vehículo con el tiempo, en base a la información de la tabla 10. Por ejemplo, para incrementar la

temperatura de 0°C a 1°C, para un sistema con una sola bomba de calor, se requeriría esperar aproximadamente 36 minutos, para un sistema con dos bombas de calor, se requeriría esperar aproximadamente 18 minutos, para un sistema con tres bombas de calor, se requeriría esperar aproximadamente 12 minutos y para un sistema con cuatro bombas de calor, se requeriría esperar aproximadamente 9 minutos.

#### **4.2 Contrastación de hipótesis**

Respecto a la hipótesis planteada sobre analizar termodinámicamente un sistema de bomba de calor para influir en el rango de autonomía en condiciones de temperatura baja, se considera que la hipótesis es positiva en base a lo siguiente:

- Empleando cuatros unidades del sistema de bomba de calor, es necesario esperar un tiempo de tres horas aproximadamente para calentar la batería hasta una temperatura de 15°C, y el rango de recorrido se reduciría en 15%.
- El COP es alto para el sistema de bomba de calor analizado, independientemente del número de bombas de calor.

## Conclusiones

El sistema de bomba de calor para las temperaturas de trabajo consideradas en la investigación influye positivamente en el rango de autonomía del vehículo eléctrico, debido a la reducción del 15% en el mejor de los casos. Dependiendo de la temperatura del vehículo eléctrico que se desee alcanzar, una mayor cantidad de bombas de calor a utilizar en el sistema reducirá el tiempo de carga proporcionalmente. El número máximo de bombas de calor a utilizar es cuatro, debido a las dimensiones de la batería, y cada bomba de calor trabajará independientemente, por lo que los valores como la potencia de los compresores, la transferencia de calor de los condensadores a la batería, y el tiempo para calentar la temperatura de la batería, será un acumulado.

El valor del COP para el sistema de bomba de calor analizado es 4.98, lo cual significa que por cada unidad de calor que el medio ambiente transfiera al sistema de bomba de calor a través del evaporador, el sistema entregará a la batería cinco unidades de calor a través del condensador de cada bomba de calor. Si bien es cierto que no se tiene una longitud exacta del tramo de tubo requerido en el evaporador, lo principal es conocer la longitud del tramo en el condensador, debido a que interactúa directamente con la batería del vehículo y es el encargado de transferir el calor. Además, como la longitud en el tramo del condensador es considerablemente inferior a las dimensiones de la batería, esto permite que se utilicen más bombas de calor para disminuir el tiempo que se necesitaría para calentar la batería hasta la temperatura deseada.

El tiempo requerido para recargar la batería dependerá de la temperatura que el usuario desee alcanzar. Por ejemplo, para calentar la batería desde 0°C a 15°C con el sistema de una bomba de calor, tomando de intervalos de 3°C, se estima un tiempo de 112.3 minutos para calentar la batería hasta 3°C, un tiempo de 234.6 minutos para calentar la batería hasta 6°C, un tiempo de 369.1 minutos para calentar la batería hasta 9°C, un tiempo de 519 minutos para calentar la batería hasta 12°C, y un tiempo de 689.1 minutos

para calentar la batería hasta 15°C. Como el tiempo es considerablemente mayor, al utilizar una mayor cantidad de bombas de calor, el tiempo disminuirá proporcionalmente.

El valor del calor transferido del sistema de bomba de calor a la batería disminuirá a medida que la temperatura se incremente, hasta casi un 40%, independientemente del número de bombas de calor que utilicen en el sistema. El principal factor de la disminución es el flujo de masa en bomba de calor, ya que su valor también decrece a medida que la temperatura en la batería es mayor. Cabe destacar que cuando se utiliza más de una bomba de calor, el flujo de calor total será la suma de cada uno.

## Recomendaciones

Para un mejor análisis del sistema de bomba de calor sobre la batería, se consideraría la longitud del tramo de tubería del evaporador, sin embargo, en la literatura revisada, no se encontró una ecuación equivalente para determinar la entalpía, como sí sucedió para el caso del condensador con la ecuación de Chato. Esto debido a la complejidad de estudiar el estado en el que se encuentra el fluido dentro de la zona saturada, ya que a medida que se calienta el refrigerante, su calidad varía, y el coeficiente de la entalpía también.

Respecto de la ecuación de Chato, el flujo de masa en el sistema se encuentra limitado por el número de Reynolds máximo que permite la ecuación. En el caso se utilice un flujo de masa mayor a lo permitido, se utilizaría ecuaciones más complejas, como la de Rosehnow, pero similar al análisis en el evaporador, sería complicado analizarlo ya que son ecuaciones más experimentales.

El tiempo para aumentar la temperatura de la batería a la requerida sería menor con un flujo de masa mayor, por lo que la investigación es como un punto de partida para investigaciones a futuro que experimente con un modelo real. Lo que se espera es que el coeficiente de entalpía calculado a través de Chato en la zona saturada del condensador sea mucho mayor, por lo que la transferencia de calor también lo será, y el tiempo requerido será mucho menor. Por lo cual sería posible utilizar un sistema con solo una bomba de calor en vez de cuatro bombas de calor.

## Referencias

- Ali, Z., Calasan, M., Gandoman, F., Jurado, F., & Abdel Aleem, S. (2024). Review of batteries reliability in electric vehicle and E-mobility applications. *Ain Shams Engineering Journal*.
- Alvarez Jara, R. W., Loloy Polo, N. R., Sotomayor Berrio, R. L., & Vivanco Zacarías, E. M. (2022). *Despliegue de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos particulares en la ciudad de Lima*. Lima.
- Argue, C. (2023, February 6). GEOTAB. Retrieved from GEOTAB: <https://www.geotab.com/blog/ev-range-impact-of-speed-and-temperature/>
- Arias Pérez, D. (2015). *Influencia del vehículo eléctrico sobre la fiabilidad de los sistemas eléctricos*. Leganés.
- Badiali, S., & Colombo, S. (2009). *Dynamic Modelling of Mechanical Heat Pumps for Comfort Heating*.
- Baniasadi, A. (2020). *Application of heat pumps and thermal storage systems for improved control and performance of microgrids*.
- Barros Guiracocha, H. P., & Ortega Ortega, L. A. (2018). *Análisis y Diseño de la Instalación Eléctrica de una Electrolinera en la Ciudad de Cuenca*. Cuenca.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2014). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*. New York: McGraw-Hill "FALTA".
- Cuno Yauri, D. (2020). *Factibilidad técnica y económica para la conversión de vehículos en la región arequipa, consideraciones para la normalización de la movilidad eléctrica*. Arequipa.
- De Leon Ruiz, J. E. (2015). *Modelo matemático y diseño de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar para calentamiento de agua*.
- Forero Díaz, S. M. (2013). *Sadi Carnot, el ciclo ideal*. Bogotá.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2015). *Guía del Vehículo Eléctrico II*. Madrid.



- Garcia Ruiz, M. (2015). *Pasado, presente y futuro de vehiculos electricos*. Pereira.
- Holman, J. P. (1998). *Transfrecencia de calor*.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons.
- Isla, L., Singla, M., Rodríguez Porcel, M., & Granda, I. (2019). *Análisis de Tecnología, Industria, y Mercado para Vehículos Eléctricos en América Latina y el Caribe*.
- Jin, C. (2020). *Coche eléctrico y la batería: situación actual de mercado y su modelo de operación comercial*.
- Jung, H. (2020). Fuel Economy of Plug-In Hybrid Electric and Hybrid Electric Vehicles: Effects of Vehicle Weight, Hybridization Ratio and Ambient Temperature. *World Electric Vehicle Journal*.
- Kalogiannis, T., Jaguemont, J., Omar, N., Van Mierlo, J., Bossche, V. d., & Peter. (2019). *A Comparison of Internal and External Preheat Methods for NMC Batteries*.
- Li, J., & Zhu, Z. (2014). *Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles*. Göteborg.
- Moser Kahl, F. T. (2015). *Medición experimental del comportamiento térmico de una batería de ión-litio*. Santiago de Chile.
- NISSAN. (2018). *First Responders' Guide*.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. S. (2001). *Física Vol. 1*. Compañía Editorial Continental.
- Ryan Kronk, J. (2021). *Optimizing Electric Vehicle Capacity for Frequency Containment Reserves*. Barcelona.
- Steinstraeter, M., Heinrich, T., & Lienkamp, M. (2021). Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range. *World Electric Vehicle Journal*.
- Szumaska, E., & Jurecki, R. (2021). Parameters Influencing on Electric Vehicle Range. *Energies*.

- Thompson, T. (2021). *Modeling Air Source Heat Pump Adoption Propensity and Simulating the Distribution Level Effects of Large-Scale Adoption*.
- Wager, G. (2017). *Energy Efficiency of Electric Vehicles and Recharging Technologies under Consideration of Usage Profiles*.
- Wilber, M., Whitney, E., Leach, T., Hauptert, C., & Pike, C. (2021). *Cold Weather Issues for Electric Vehicles (EVs) in Alaska*.
- Ye, Z., Fu, X., & Zhou, S. (2024). Research on control strategy of rapid preheating for power battery in electric vehicle at low temperatures. *Applied Thermal Engineering*.
- Zhao, C., Li, Y., Yang, Y., Wan, S., Yu, F., Yu, C., . . . Shen, X. (2022). *Research on electric vehicle range under cold condition*.

## Anexos

### Anexo 1: Matriz de Consistencia.

Título: “Análisis Termodinámico de evaluación de la factibilidad de utilizar Bombas de Calor para aumentar la Autonomía de un Vehículo Eléctrico”.

| PROBLEMA                                                        | OBJETIVO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | VARIABLES                           |                 | INDICADORES                                                                                                                                                                    | TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | DEPENDIENTE                         | INDEPENDIENTE   |                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                         |
| ¿De qué manera se mejora la autonomía de un vehículo eléctrico? | <p>Objetivo general:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluar la factibilidad de utilizar un sistema de bomba de calor para mejorar la autonomía de un vehículo eléctrico .</li> </ul> <p>Objetivos específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Calcular el coeficiente de performance del sistema de bomba de calor para mejorar la autonomía del vehículo eléctrico.</li> <li>Determinar el tiempo que requiere el sistema de bomba de calor para calentar la batería a la temperatura requerida.</li> <li>Determinar el valor del calor transferido del sistema de bomba de calor para calentar la batería.</li> </ul> | <p>Hipótesis general:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La aplicación de un sistema de bomba de calor para vehículos eléctricos influirá en el rango de autonomía.</li> </ul> <p>Hipótesis específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>El valor del COP del sistema de bomba de calor influirá en el rango de autonomía en condiciones de temperatura baja.</li> <li>El tiempo requerido para calentar la batería a la temperatura deseada influirá en el rango de autonomía del vehículo eléctrico.</li> <li>El calor transferido del sistema de bomba de calor influirá en la temperatura de la batería.</li> </ul> | Autonomía de un vehículo eléctrico. | Bomba de calor. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura del medio ambiente.</li> <li>Temperatura de trabajo de la batería.</li> <li>Distancia recorrida por el vehículo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hoja de datos de las propiedades del refrigerante del sistema</li> <li>Hoja de datos de las características de la unidad de análisis.</li> </ul> |

## Anexo 2: Tabla de valores saturados del refrigerante 134a

| Temp.<br><i>T</i> , °C | Saturation<br>Pressure<br><i>P</i> , kPa | Density<br>$\rho$ , kg/m <sup>3</sup> |       | Enthalpy<br>of<br>Vaporization<br><i>h</i> <sub>fg</sub> , kJ/kg | Specific<br>Heat<br><i>c</i> <sub>p</sub> , J/kg·K |       | Thermal<br>Conductivity<br><i>k</i> , W/m·K |         | Dynamic Viscosity<br>$\mu$ , kg/m·s |                        | Prandtl<br>Number<br>Pr |       | Volume<br>Expansion<br>Coefficient<br>$\beta$ , 1/K | Surface<br>Tension,<br>N/m |
|------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|---------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------------------------------|----------------------------|
|                        |                                          | Liquid                                | Vapor |                                                                  | Liquid                                             | Vapor | Liquid                                      | Vapor   | Liquid                              | Vapor                  | Liquid                  | Vapor |                                                     |                            |
| -40                    | 51.2                                     | 1418                                  | 2.773 | 225.9                                                            | 1254                                               | 748.6 | 0.1101                                      | 0.00811 | $4.878 \times 10^{-4}$              | $2.550 \times 10^{-6}$ | 5.558                   | 0.235 | 0.00205                                             | 0.01760                    |
| -35                    | 66.2                                     | 1403                                  | 3.524 | 222.7                                                            | 1264                                               | 764.1 | 0.1084                                      | 0.00862 | $4.509 \times 10^{-4}$              | $3.003 \times 10^{-6}$ | 5.257                   | 0.266 | 0.00209                                             | 0.01682                    |
| -30                    | 84.4                                     | 1389                                  | 4.429 | 219.5                                                            | 1273                                               | 780.2 | 0.1066                                      | 0.00913 | $4.178 \times 10^{-4}$              | $3.504 \times 10^{-6}$ | 4.992                   | 0.299 | 0.00215                                             | 0.01604                    |
| -25                    | 106.5                                    | 1374                                  | 5.509 | 216.3                                                            | 1283                                               | 797.2 | 0.1047                                      | 0.00963 | $3.882 \times 10^{-4}$              | $4.054 \times 10^{-6}$ | 4.757                   | 0.335 | 0.00220                                             | 0.01527                    |
| -20                    | 132.8                                    | 1359                                  | 6.787 | 213.0                                                            | 1294                                               | 814.9 | 0.1028                                      | 0.01013 | $3.614 \times 10^{-4}$              | $4.651 \times 10^{-6}$ | 4.548                   | 0.374 | 0.00227                                             | 0.01451                    |
| -15                    | 164.0                                    | 1343                                  | 8.288 | 209.5                                                            | 1306                                               | 833.5 | 0.1009                                      | 0.01063 | $3.371 \times 10^{-4}$              | $5.295 \times 10^{-6}$ | 4.363                   | 0.415 | 0.00233                                             | 0.01376                    |
| -10                    | 200.7                                    | 1327                                  | 10.04 | 206.0                                                            | 1318                                               | 853.1 | 0.0989                                      | 0.01112 | $3.150 \times 10^{-4}$              | $5.982 \times 10^{-6}$ | 4.198                   | 0.459 | 0.00241                                             | 0.01302                    |
| -5                     | 243.5                                    | 1311                                  | 12.07 | 202.4                                                            | 1330                                               | 873.8 | 0.0968                                      | 0.01161 | $2.947 \times 10^{-4}$              | $6.709 \times 10^{-6}$ | 4.051                   | 0.505 | 0.00249                                             | 0.01229                    |
| 0                      | 293.0                                    | 1295                                  | 14.42 | 198.7                                                            | 1344                                               | 895.6 | 0.0947                                      | 0.01210 | $2.761 \times 10^{-4}$              | $7.471 \times 10^{-6}$ | 3.919                   | 0.553 | 0.00258                                             | 0.01156                    |
| 5                      | 349.9                                    | 1278                                  | 17.12 | 194.8                                                            | 1358                                               | 918.7 | 0.0925                                      | 0.01259 | $2.589 \times 10^{-4}$              | $8.264 \times 10^{-6}$ | 3.802                   | 0.603 | 0.00269                                             | 0.01084                    |
| 10                     | 414.9                                    | 1261                                  | 20.22 | 190.8                                                            | 1374                                               | 943.2 | 0.0903                                      | 0.01308 | $2.430 \times 10^{-4}$              | $9.081 \times 10^{-6}$ | 3.697                   | 0.655 | 0.00280                                             | 0.01014                    |
| 15                     | 488.7                                    | 1244                                  | 23.75 | 186.6                                                            | 1390                                               | 969.4 | 0.0880                                      | 0.01357 | $2.281 \times 10^{-4}$              | $9.915 \times 10^{-6}$ | 3.604                   | 0.708 | 0.00293                                             | 0.00944                    |
| 20                     | 572.1                                    | 1226                                  | 27.77 | 182.3                                                            | 1408                                               | 997.6 | 0.0856                                      | 0.01406 | $2.142 \times 10^{-4}$              | $1.075 \times 10^{-5}$ | 3.521                   | 0.763 | 0.00307                                             | 0.00876                    |
| 25                     | 665.8                                    | 1207                                  | 32.34 | 177.8                                                            | 1427                                               | 1028  | 0.0833                                      | 0.01456 | $2.012 \times 10^{-4}$              | $1.160 \times 10^{-5}$ | 3.448                   | 0.819 | 0.00324                                             | 0.00808                    |
| 30                     | 770.6                                    | 1188                                  | 37.53 | 173.1                                                            | 1448                                               | 1061  | 0.0808                                      | 0.01507 | $1.888 \times 10^{-4}$              | $1.244 \times 10^{-5}$ | 3.383                   | 0.877 | 0.00342                                             | 0.00742                    |
| 35                     | 887.5                                    | 1168                                  | 43.41 | 168.2                                                            | 1471                                               | 1098  | 0.0783                                      | 0.01558 | $1.772 \times 10^{-4}$              | $1.327 \times 10^{-5}$ | 3.328                   | 0.935 | 0.00364                                             | 0.00677                    |
| 40                     | 1017.1                                   | 1147                                  | 50.08 | 163.0                                                            | 1498                                               | 1138  | 0.0757                                      | 0.01610 | $1.660 \times 10^{-4}$              | $1.408 \times 10^{-5}$ | 3.285                   | 0.995 | 0.00390                                             | 0.00613                    |
| 45                     | 1160.5                                   | 1125                                  | 57.66 | 157.6                                                            | 1529                                               | 1184  | 0.0731                                      | 0.01664 | $1.554 \times 10^{-4}$              | $1.486 \times 10^{-5}$ | 3.253                   | 1.058 | 0.00420                                             | 0.00550                    |
| 50                     | 1318.6                                   | 1102                                  | 66.27 | 151.8                                                            | 1566                                               | 1237  | 0.0704                                      | 0.01720 | $1.453 \times 10^{-4}$              | $1.562 \times 10^{-5}$ | 3.231                   | 1.123 | 0.00455                                             | 0.00489                    |
| 55                     | 1492.3                                   | 1078                                  | 76.11 | 145.7                                                            | 1608                                               | 1298  | 0.0676                                      | 0.01777 | $1.355 \times 10^{-4}$              | $1.634 \times 10^{-5}$ | 3.223                   | 1.193 | 0.00500                                             | 0.00429                    |
| 60                     | 1682.8                                   | 1053                                  | 87.38 | 139.1                                                            | 1659                                               | 1372  | 0.0647                                      | 0.01838 | $1.260 \times 10^{-4}$              | $1.704 \times 10^{-5}$ | 3.229                   | 1.272 | 0.00554                                             | 0.00372                    |
| 65                     | 1891.0                                   | 1026                                  | 100.4 | 132.1                                                            | 1722                                               | 1462  | 0.0618                                      | 0.01902 | $1.167 \times 10^{-4}$              | $1.771 \times 10^{-5}$ | 3.255                   | 1.362 | 0.00624                                             | 0.00315                    |
| 70                     | 2118.2                                   | 996.2                                 | 115.6 | 124.4                                                            | 1801                                               | 1577  | 0.0587                                      | 0.01972 | $1.077 \times 10^{-4}$              | $1.839 \times 10^{-5}$ | 3.307                   | 1.471 | 0.00716                                             | 0.00261                    |
| 75                     | 2365.8                                   | 964                                   | 133.6 | 115.9                                                            | 1907                                               | 1731  | 0.0555                                      | 0.02048 | $9.891 \times 10^{-5}$              | $1.908 \times 10^{-5}$ | 3.400                   | 1.612 | 0.00843                                             | 0.00209                    |
| 80                     | 2635.2                                   | 928.2                                 | 155.3 | 106.4                                                            | 2056                                               | 1948  | 0.0521                                      | 0.02133 | $9.011 \times 10^{-5}$              | $1.982 \times 10^{-5}$ | 3.558                   | 1.810 | 0.01031                                             | 0.00160                    |
| 85                     | 2928.2                                   | 887.1                                 | 182.3 | 95.4                                                             | 2287                                               | 2281  | 0.0484                                      | 0.02233 | $8.124 \times 10^{-5}$              | $2.071 \times 10^{-5}$ | 3.837                   | 2.116 | 0.01336                                             | 0.00114                    |
| 90                     | 3246.9                                   | 837.7                                 | 217.8 | 82.2                                                             | 2701                                               | 2865  | 0.0444                                      | 0.02357 | $7.203 \times 10^{-5}$              | $2.187 \times 10^{-5}$ | 4.385                   | 2.658 | 0.01911                                             | 0.00071                    |
| 95                     | 3594.1                                   | 772.5                                 | 269.3 | 64.9                                                             | 3675                                               | 4144  | 0.0396                                      | 0.02544 | $6.190 \times 10^{-5}$              | $2.370 \times 10^{-5}$ | 5.746                   | 3.862 | 0.03343                                             | 0.00033                    |
| 100                    | 3975.1                                   | 651.7                                 | 376.3 | 33.9                                                             | 7959                                               | 8785  | 0.0322                                      | 0.02989 | $4.765 \times 10^{-5}$              | $2.833 \times 10^{-5}$ | 11.77                   | 8.326 | 0.10047                                             | 0.00004                    |

**Anexo 3: Dimensiones de la batería del Nissan Leaf 2018**

**2.2.1 Li-ion Battery Pack Specifications**

|                                              |                                                              |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Li-ion battery voltage                       | 360V Nominal (240V - 398.4V usable range)                    |
| Number of Li-ion battery modules in the pack | 48                                                           |
| Li-ion battery dimensions                    | 60.91 x 46.77 x 10.39 in. (1547 x 1188 x 264 mm)             |
| Li-ion battery weight                        | Depending on the type:<br>approx. 273-296 kg (602 - 653 lbs) |

## Anexo 4: Características técnicas del Nissan Leaf 2018

### LEAF TECHNICAL DATA

|                                                           |        | ACENTA                                           | N-CONNECTA              | TEKNA                   | e+ TEKNA                |
|-----------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| MODEL                                                     |        |                                                  |                         |                         |                         |
| Engine type                                               |        | Electric Motor                                   | Electric Motor          | Electric Motor          | Electric Motor          |
| Drivetrain                                                |        | 2WD                                              | 2WD                     | 2WD                     | 2WD                     |
| Seating capacity                                          |        | 5                                                | 5                       | 5                       | 5                       |
| Overall Length                                            | mm     | 4490                                             | 4490                    | 4490                    | 4490                    |
| Overall Width without mirrors                             | mm     | 1788                                             | 1788                    | 1788                    | 1788                    |
| Overall Width with mirrors                                | mm     | 2030                                             | 2030                    | 2030                    | 2030                    |
| Overall Height (unladen)                                  | mm     | 1530                                             | 1540                    | 1540                    | 1545                    |
| Kerb Weight min / max                                     | kg     | 1580 - 1640                                      | 1580 - 1640             | 1580 - 1640             | 1731 - 1791             |
| Gross Vehicle Weight                                      | kg     | 1995                                             | 1995                    | 1995                    | 2140                    |
| Maximum payload                                           | kg     | 450                                              | 450                     | 450                     | 450                     |
| Maximum roof load                                         | kg     | 35                                               | 35                      | 35                      | 35                      |
| Wheelbase                                                 | mm     | 2700                                             | 2700                    | 2700                    | 2700                    |
| Overhang, front/rear                                      | mm     | 1005 / 785                                       | 1005 / 785              | 1005 / 785              | 1005 / 785              |
| Track front                                               | mm     | 1540 / 1530                                      | 1540 / 1530             | 1540 / 1530             | 1540 / 1530             |
| Track rear                                                | mm     | 1555 / 1545                                      | 1555 / 1545             | 1555 / 1545             | 1555 / 1545             |
| Turning circle, kerb to kerb                              | m      | 10.6                                             | 11.0                    | 11.0                    | 11.0                    |
| Luggage capacity (without parcel shelf)                   | litres | 435                                              | 435                     | 420                     | 420                     |
| Luggage capacity (with parcel shelf)                      | litres | 400                                              | 400                     | 385                     | 385                     |
| Luggage/Trunk capacity with folded seats VDA (up to roof) | litres | 1176                                             | 1176                    | 1161                    | 1161                    |
| Luggage space, max length                                 | mm     | 790                                              | 790                     | 790                     | 790                     |
| Luggage space, max width                                  | mm     | 1103                                             | 1103                    | 1103                    | 1103                    |
| Minimum ground clearance                                  | mm     | 155                                              | 155                     | 155                     | 135                     |
| CHASSIS                                                   |        |                                                  |                         |                         |                         |
| Driven wheels                                             |        | Front Wheel Drive                                |                         |                         |                         |
| Transmission                                              |        | Automatic                                        |                         |                         |                         |
| Suspension, front                                         |        | MacPherson strut                                 |                         |                         |                         |
| Suspension, rear                                          |        | Twist beam axle                                  |                         |                         |                         |
| Steering                                                  |        | Electric power assisted                          |                         |                         |                         |
| Brakes, front                                             |        | Vented discs with Twin-piston sliding caliper    |                         |                         |                         |
| Brakes, rear                                              |        | Vented discs with single-piston floating caliper |                         |                         |                         |
| Battery type                                              |        | Laminated lithium ion                            |                         |                         |                         |
| Voltage                                                   | V      | 350                                              | 350                     | 350                     | 350                     |
| Battery capacity                                          | kWh    | 40                                               | 40                      | 40                      | 62                      |
| Tyre size                                                 |        | 205/55R16 91V                                    | 215/50R17 91V           | 215/50R17 91V           | 215/50R17 91V           |
| Wheel size                                                |        | 6.5 J x 16<br>16" Alloy                          | 6.5 J x 17<br>17" Alloy | 6.5 J x 17<br>17" Alloy | 6.5 J x 17<br>17" Alloy |

## Anexo 5: Características técnicas del Nissan Leaf 2018 (Continuación)

|                                   |                        | ACENTA                                                                                                                                                                                 | N-CONNECTA | TEKNA | e+ TEKNA                       |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|--------------------------------|
| PERFORMANCE                       |                        |                                                                                                                                                                                        |            |       |                                |
| Acceleration                      | 0 - 62mph (0 - 100kph) | 7.9                                                                                                                                                                                    | 7.9        | 7.9   | 7.3                            |
| Max speed                         | mph                    | 90                                                                                                                                                                                     | 90         | 90    | 98                             |
| Electricity consumption           | Wh/km                  | 206                                                                                                                                                                                    | 206        | 206   | 180                            |
| Range (WLTP) combined             | miles                  | 168                                                                                                                                                                                    | 168        | 168   | 239                            |
| Range (WLTP) City                 | miles                  | 242                                                                                                                                                                                    | 242        | 242   | 319                            |
| Max engine power                  | Kw/PS/min-1            | 110kW / 150PS / 3283 - 9795rpm                                                                                                                                                         |            |       | 160kW / 217PS / 4600 - 5800rpm |
| Max torque                        | Nm/min-1               | 320Nm / 0 - 3283rpm                                                                                                                                                                    |            |       | 340Nm / 500 - 4000rpm          |
| CHARGING                          |                        |                                                                                                                                                                                        |            |       |                                |
| On-board charger                  | kW                     | 3.6                                                                                                                                                                                    | 6.6        | 6.6   | 6.6                            |
| Quick charger capability          | kW                     | 50                                                                                                                                                                                     |            |       | 100                            |
| Charging Cable                    | m                      | EVSE (6m) and Mode 3 (6m)                                                                                                                                                              |            |       |                                |
| 3.6kW OBC on 32A Wallbox          | Empty warning to 100%  | 13h                                                                                                                                                                                    | N/A        | N/A   | N/A                            |
| 6.6kW OBC on 32A Wallbox          | Empty warning to 100%  | N/A                                                                                                                                                                                    | 7h30       |       | 11h30                          |
| 10A EVSE cable on domestic socket | Empty warning to 100%  | 21h                                                                                                                                                                                    |            |       | 32h                            |
| 50kW Quick Charger                | 20% to 80%             | *Time dependent on charging conditions, including Quick Charger type and condition, battery temperature and size as well as ambient temperature at point of use.<br>Around 60 minutes* |            |       | TBC                            |

\*Figures quoted are for a 40kWh battery. Time dependent on charging conditions, including charger type and condition, battery temperature as well as ambient temperature at point of use. Indicated rapid charging time requires use of a CHADEMO rapid charger. The Nissan LEAF is designed to support the majority of journeys in daily life and is equipped with charging safeguards to protect the battery during repeated rapid charging sessions in a short period of time. The time taken for successive rapid charging can take longer if the battery temperature activates the battery safeguarding technology.

## Anexo 6: Propiedades saturadas del refrigerante R134a

Properties of saturated refrigerant-134a

| Temp.<br><i>T</i> , °C | Saturation<br>Pressure<br><i>P</i> , kPa | Density<br>$\rho$ , kg/m <sup>3</sup> |       | Enthalpy<br>of<br>Vaporization<br><i>h</i> <sub>fg</sub> , kJ/kg | Specific<br>Heat<br><i>c</i> <sub>p</sub> , J/kg·K |       | Thermal<br>Conductivity<br><i>k</i> , W/m·K |         | Dynamic Viscosity<br>$\mu$ , kg/m·s |                        | Prandtl<br>Number<br>Pr |       | Volume<br>Expansion<br>Coefficient<br>$\beta$ , 1/K | Surface<br>Tension,<br>N/m |
|------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|---------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------------------------------|----------------------------|
|                        |                                          | Liquid                                | Vapor |                                                                  | Liquid                                             | Vapor | Liquid                                      | Vapor   | Liquid                              | Vapor                  | Liquid                  | Vapor |                                                     |                            |
| -40                    | 51.2                                     | 1418                                  | 2.773 | 225.9                                                            | 1254                                               | 748.6 | 0.1101                                      | 0.00811 | $4.878 \times 10^{-4}$              | $2.550 \times 10^{-6}$ | 5.558                   | 0.235 | 0.00205                                             | 0.01760                    |
| -35                    | 66.2                                     | 1403                                  | 3.524 | 222.7                                                            | 1264                                               | 764.1 | 0.1084                                      | 0.00862 | $4.509 \times 10^{-4}$              | $3.003 \times 10^{-6}$ | 5.257                   | 0.266 | 0.00209                                             | 0.01682                    |
| -30                    | 84.4                                     | 1389                                  | 4.429 | 219.5                                                            | 1273                                               | 780.2 | 0.1066                                      | 0.00913 | $4.178 \times 10^{-4}$              | $3.504 \times 10^{-6}$ | 4.992                   | 0.299 | 0.00215                                             | 0.01604                    |
| -25                    | 106.5                                    | 1374                                  | 5.509 | 216.3                                                            | 1283                                               | 797.2 | 0.1047                                      | 0.00963 | $3.882 \times 10^{-4}$              | $4.054 \times 10^{-6}$ | 4.757                   | 0.335 | 0.00220                                             | 0.01527                    |
| -20                    | 132.8                                    | 1359                                  | 6.787 | 213.0                                                            | 1294                                               | 814.9 | 0.1028                                      | 0.01013 | $3.614 \times 10^{-4}$              | $4.651 \times 10^{-6}$ | 4.548                   | 0.374 | 0.00227                                             | 0.01451                    |
| -15                    | 164.0                                    | 1343                                  | 8.288 | 209.5                                                            | 1306                                               | 833.5 | 0.1009                                      | 0.01063 | $3.371 \times 10^{-4}$              | $5.295 \times 10^{-6}$ | 4.363                   | 0.415 | 0.00233                                             | 0.01376                    |
| -10                    | 200.7                                    | 1327                                  | 10.04 | 206.0                                                            | 1318                                               | 853.1 | 0.0989                                      | 0.01112 | $3.150 \times 10^{-4}$              | $5.982 \times 10^{-6}$ | 4.198                   | 0.459 | 0.00241                                             | 0.01302                    |
| -5                     | 243.5                                    | 1311                                  | 12.07 | 202.4                                                            | 1330                                               | 873.8 | 0.0968                                      | 0.01161 | $2.947 \times 10^{-4}$              | $6.709 \times 10^{-6}$ | 4.051                   | 0.505 | 0.00249                                             | 0.01229                    |
| 0                      | 293.0                                    | 1295                                  | 14.42 | 198.7                                                            | 1344                                               | 895.6 | 0.0947                                      | 0.01210 | $2.761 \times 10^{-4}$              | $7.471 \times 10^{-6}$ | 3.919                   | 0.553 | 0.00258                                             | 0.01156                    |
| 5                      | 349.9                                    | 1278                                  | 17.12 | 194.8                                                            | 1358                                               | 918.7 | 0.0925                                      | 0.01259 | $2.589 \times 10^{-4}$              | $8.264 \times 10^{-6}$ | 3.802                   | 0.603 | 0.00269                                             | 0.01084                    |
| 10                     | 414.9                                    | 1261                                  | 20.22 | 190.8                                                            | 1374                                               | 943.2 | 0.0903                                      | 0.01308 | $2.430 \times 10^{-4}$              | $9.081 \times 10^{-6}$ | 3.697                   | 0.655 | 0.00280                                             | 0.01014                    |
| 15                     | 488.7                                    | 1244                                  | 23.75 | 186.6                                                            | 1390                                               | 969.4 | 0.0880                                      | 0.01357 | $2.281 \times 10^{-4}$              | $9.915 \times 10^{-6}$ | 3.604                   | 0.708 | 0.00293                                             | 0.00944                    |
| 20                     | 572.1                                    | 1226                                  | 27.77 | 182.3                                                            | 1408                                               | 997.6 | 0.0856                                      | 0.01406 | $2.142 \times 10^{-4}$              | $1.075 \times 10^{-5}$ | 3.521                   | 0.763 | 0.00307                                             | 0.00876                    |
| 25                     | 665.8                                    | 1207                                  | 32.34 | 177.8                                                            | 1427                                               | 1028  | 0.0833                                      | 0.01456 | $2.012 \times 10^{-4}$              | $1.160 \times 10^{-5}$ | 3.448                   | 0.819 | 0.00324                                             | 0.00808                    |
| 30                     | 770.6                                    | 1188                                  | 37.53 | 173.1                                                            | 1448                                               | 1061  | 0.0808                                      | 0.01507 | $1.888 \times 10^{-4}$              | $1.244 \times 10^{-5}$ | 3.383                   | 0.877 | 0.00342                                             | 0.00742                    |
| 35                     | 887.5                                    | 1168                                  | 43.41 | 168.2                                                            | 1471                                               | 1098  | 0.0783                                      | 0.01558 | $1.772 \times 10^{-4}$              | $1.327 \times 10^{-5}$ | 3.328                   | 0.935 | 0.00364                                             | 0.00677                    |
| 40                     | 1017.1                                   | 1147                                  | 50.08 | 163.0                                                            | 1498                                               | 1138  | 0.0757                                      | 0.01610 | $1.660 \times 10^{-4}$              | $1.408 \times 10^{-5}$ | 3.285                   | 0.995 | 0.00390                                             | 0.00613                    |
| 45                     | 1160.5                                   | 1125                                  | 57.66 | 157.6                                                            | 1529                                               | 1184  | 0.0731                                      | 0.01664 | $1.554 \times 10^{-4}$              | $1.486 \times 10^{-5}$ | 3.253                   | 1.058 | 0.00420                                             | 0.00550                    |
| 50                     | 1318.6                                   | 1102                                  | 66.27 | 151.8                                                            | 1566                                               | 1237  | 0.0704                                      | 0.01720 | $1.453 \times 10^{-4}$              | $1.562 \times 10^{-5}$ | 3.231                   | 1.123 | 0.00455                                             | 0.00489                    |
| 55                     | 1492.3                                   | 1078                                  | 76.11 | 145.7                                                            | 1608                                               | 1298  | 0.0676                                      | 0.01777 | $1.355 \times 10^{-4}$              | $1.634 \times 10^{-5}$ | 3.223                   | 1.193 | 0.00500                                             | 0.00429                    |
| 60                     | 1682.8                                   | 1053                                  | 87.38 | 139.1                                                            | 1659                                               | 1372  | 0.0647                                      | 0.01838 | $1.260 \times 10^{-4}$              | $1.704 \times 10^{-5}$ | 3.229                   | 1.272 | 0.00554                                             | 0.00372                    |
| 65                     | 1891.0                                   | 1026                                  | 100.4 | 132.1                                                            | 1722                                               | 1462  | 0.0618                                      | 0.01902 | $1.167 \times 10^{-4}$              | $1.771 \times 10^{-5}$ | 3.255                   | 1.362 | 0.00624                                             | 0.00315                    |
| 70                     | 2118.2                                   | 996.2                                 | 115.6 | 124.4                                                            | 1801                                               | 1577  | 0.0587                                      | 0.01972 | $1.077 \times 10^{-4}$              | $1.839 \times 10^{-5}$ | 3.307                   | 1.471 | 0.00716                                             | 0.00261                    |
| 75                     | 2365.8                                   | 964                                   | 133.6 | 115.9                                                            | 1907                                               | 1731  | 0.0555                                      | 0.02048 | $9.891 \times 10^{-5}$              | $1.908 \times 10^{-5}$ | 3.400                   | 1.612 | 0.00843                                             | 0.00209                    |
| 80                     | 2635.2                                   | 928.2                                 | 155.3 | 106.4                                                            | 2056                                               | 1948  | 0.0521                                      | 0.02133 | $9.011 \times 10^{-5}$              | $1.982 \times 10^{-5}$ | 3.558                   | 1.810 | 0.01031                                             | 0.00160                    |
| 85                     | 2928.2                                   | 887.1                                 | 182.3 | 95.4                                                             | 2287                                               | 2281  | 0.0484                                      | 0.02233 | $8.124 \times 10^{-5}$              | $2.071 \times 10^{-5}$ | 3.837                   | 2.116 | 0.01336                                             | 0.00114                    |
| 90                     | 3246.9                                   | 837.7                                 | 217.8 | 82.2                                                             | 2701                                               | 2865  | 0.0444                                      | 0.02357 | $7.203 \times 10^{-5}$              | $2.187 \times 10^{-5}$ | 4.385                   | 2.658 | 0.01911                                             | 0.00071                    |
| 95                     | 3594.1                                   | 772.5                                 | 269.3 | 64.9                                                             | 3675                                               | 4144  | 0.0396                                      | 0.02544 | $6.190 \times 10^{-5}$              | $2.370 \times 10^{-5}$ | 5.746                   | 3.862 | 0.03343                                             | 0.00033                    |
| 100                    | 3975.1                                   | 651.7                                 | 376.3 | 33.9                                                             | 7959                                               | 8785  | 0.0322                                      | 0.02989 | $4.765 \times 10^{-5}$              | $2.833 \times 10^{-5}$ | 11.77                   | 8.326 | 0.10047                                             | 0.00004                    |

Note 1: Kinematic viscosity  $\nu$  and thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated from their definitions,  $\nu = \mu/\rho$  and  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$ . The properties listed here (except the vapor density) can be used at any pressures with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: R. Tillner-Roth and H. D. Baehr, "An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures from 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 23, No. 5, 1994; M.J. Assael, N. K. Dalaouti, A. A. Griva, and J. H. Dymond, "Viscosity and Thermal Conductivity of Halogenated Methane and Ethane Refrigerants," *IJR*, Vol. 22, pp. 525-535, 1999; NIST REFPROP 6 program (M. O. McLinden, S. A. Klein, E. W. Lemmon, and A. P. Peskin, Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80303, 1995).