



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

Análisis CFD del comportamiento térmico de una cabina climatizada de un vehículo SUV
validado mediante un modelo matemático

Realizado por:

Julio Cesar Almeida Guayasamín

Director del proyecto:

Dr. Jesús López Villada

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

QUITO, Abril del 2024

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Julio Cesar Almeida Guayasamín , ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1725665663, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.



Julio Cesar Almeida Guayasamín

C.I.: 1725665663

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Director de proyecto

Dr. Jesús López Villada

LOS PROFESORES INFORMANTES:

Ing. Jaime Vinicio Molina Osejos MSc

Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño MSc

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.



Ing. Jaime Molina MSc



Ing. Edilberto Llanes MSc

Quito, 04 de Abril de 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



Julio Cesar Almeida Guayasamín

C.I.: 1725665663

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a Dios por siempre guiarme, cuidarme y haberme permitido llegar a alcanzar con mi propósito.

También quiero dedicar a mis padres Julio Almeida y Ángela Guayasamín quienes han creído en mí siempre, dándome el ejemplo de valores, humildad, superación y sacrificio ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su cariño y paciencia ante todas las adversidades.

A mis hermanas por brindarme su apoyo incondicional sus palabras de aliento y compañía infinita, y toda mi familia en general que me han apoyado con sus consejos con su cariño y preocupación, han contribuido con el logro de mis objetivos.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por permitirme cumplir con este propósito de mi vida.

A mis padres, hermanas y toda mi familia que creyeron en mí y me brindaron su cariño, su apoyo y sacrificio para tener la oportunidad de estudiar y culminar con mi carrera.

A mi director de proyecto Dr. Jesús López Villada por compartir y brindar su conocimiento en todo el tiempo de desarrollo de este presente trabajo.

Por último, agradezco a mis profesores que me brindaron todos sus conocimientos y enseñanzas para desarrollarme profesionalmente y culminar con éxito este título.

Resumen

El análisis del comportamiento térmico de una cabina en un vehículo SUV marca Ford Escape, se hace indispensable la implementación de la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del software ANSYS 2023 R1. En correspondencia, por ser un método computacional de simulación para volúmenes finitos de eventos dinámicos, que ofrece simulaciones para la rapidez en fluir del aire acondicionado, comportamiento de la presión y las temperaturas en el habitáculo para intervalos de tiempos específicos al operar el sistema (HVAC) de aire acondicionado. Se parte de una investigación documental y de experimentación mediante simulaciones controladas para la obtención de las distribuciones del flujo de aire en las rejillas del sistema y de esta manera contribuir en la categorización del confort térmico en específicas condiciones ambientales. Una vez realizada la simulación CFD se valida mediante un modelo matemático en donde se obtiene el balance de materia y energía térmica en estado transitorio de la cabina del vehículo. En un primer modelo no se consideró la inercia de las masas contenidas en el interior de la cabina, comprobando una gran concordancia entre los resultados de la simulación CFD y el modelo matemático. Por ello posteriormente se perfeccionó dicho modelo incorporando la inercia térmica, modelo que se asemeja más a la realidad del comportamiento térmico de la cabina climatizada. A partir de los datos obtenidos, mediante el software FRÍO, también se estableció la potencia mecánica del compresor del sistema de climatización y el coeficiente de Eficiencia Energética en Refrigeración (EER). Todos Estos análisis se realizaron con el sustento en normas y parámetros técnicos nacional e internacional que permiten el desarrollo de este tipo de investigación.

Palabras Claves: Flujo del aire acondicionado, Dinámica de Fluidos Computacional, Volúmenes finitos, Simulación CFD, Confort térmico.

Abstract

The analysis of the thermal behavior of a cabin in a Ford Escape SUV vehicle requires the implementation of the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique of the ANSYS 2023 R1 software. Correspondingly, as it is a computational simulation method for finite volumes of dynamic events, it offers simulations for the speed of air conditioning flow, pressure behavior and temperatures in the cabin for specific time intervals when operating the system (HVAC) air conditioning. It is based on documentary research and experimentation through controlled simulations to obtain the air flow distributions in the system grilles and in this way contribute to the categorization of thermal comfort in specific environmental conditions. Once the CFD simulation has been carried out, it is validated using a mathematical model where the material and thermal energy balance in the transient state of the vehicle cabin is obtained. In a first model, the inertia of the masses contained inside the cabin was not considered, verifying a great agreement between the results of the CFD simulation and the mathematical model. For this reason, this model was subsequently perfected by incorporating thermal inertia, a model that more closely resembles the reality of the thermal behavior of the air-conditioned cabin. From the data obtained, using the FRÍO software, the mechanical power of the compressor of the air conditioning system and the Refrigeration Energy Efficiency coefficient (EER) were also established. All of these analyzes were carried out based on national and international technical standards and parameters that allow the development of this type of research.

Keywords: Air conditioning flow, Computational Fluid Dynamics, Finite volumes, CFD simulation, Thermal comfort.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN JURAMENTADA.....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE.....	v
Dedicatoria.....	vi
Agradecimiento.....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
ÍNDICE DE CONTENIDO	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
Introducción	18
Antecedentes	18
Planteamiento del problema.....	21
Objetivos.....	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos	22
Justificación	23
Importancia.....	23
Viabilidad.....	24
Limitaciones del estudio.....	24
Estado del arte.....	25

Fundamentación sobre refrigeración	25
Concepto de refrigeración	25
Ciclos de refrigeración	26
Descripción del sistema de aire acondicionado.....	27
Sistema de distribución de aire acondicionado automotriz	27
Compresor	28
Condensadores.....	30
Secador de filtro	30
Válvula de expansión	31
Evaporador	31
Interruptor de presión	32
Ventilador de ventilación	33
Ventilador del condensador.....	33
Refrigerantes	33
Cargas térmicas del vehículo.....	35
Tipos de cargas térmicas	35
Carga metabólica:.....	36
Carga de Radiación Solar:	37
Carga ambiental:.....	39
Carga de escape:	40
Carga del Motor:	40

Carga de ventilación:.....	41
Carga de CA:	42
Funcionamiento del compresor	43
Curva de funcionamiento del compresor.....	44
METODOLOGÍA.....	47
Diseño metodológico de la investigación.....	47
Simulación CFD del comportamiento térmico de la cabina	47
Desarrollo del modelo matemático	48
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	49
Balance de materia y energía del habitáculo del vehículo	49
Cálculo del coeficiente k1	51
Cálculo de la constante 2 (k2)	51
Cálculo de la constante 3 (k3)	51
Cálculo de la temperatura con respecto al tiempo.....	51
Representación en el espacio de los estados: Modelado geométrico de la cabina del vehículo Ford Escape	53
Parámetros y puntos de operación del modelo matemático	57
Condiciones de contorno	61
Simulación en ANSYS.....	65
Análisis comparativo de los resultados de la simulación y el modelo matemático	72
Conclusiones.....	76

Recomendaciones	77
Futuros trabajos.....	78
Referencias Bibliográficas	79
Anexos	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos para la determinación de los coeficientes k_1 , k_2 y k_3 del balance de energía	50
Tabla 2. Valores de la superficie de cada una de las rejillas de salida de aire A/C	57
Tabla 3. Valores de la cabina sin aire acondicionado	59
Tabla 4. Valores de la cabina con aire acondicionado	59
Tabla 5. Coeficiente de transferencia de calor	60
Tabla 6. Definición de parámetros de velocidad y temperatura	63
Tabla 7. Tiempo de enfriamiento y parámetros operativos del sistema de climatización automotriz	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama simple de un sistema de refrigeración	27
Figura 2. Representación esquemática de un sistema TXV-RD y su correspondiente diagrama de presión-entalpía.	29
Figura 3. Condensador	30
Figura 4. Filtro secador	30
Figura 5. Válvula de expansión	31
Figura 6. Evaporador	32
Figura 1. Interruptor de presión	32
Figura 8. Ventilador del condensador	33
Figura 9. Sistema del compresor.....	44
Figura 10. Representación gráfica del ciclo termodinámico del modelo sobre un diagrama P-H con R134a.	45
Figura 11. Perfil de temperatura en el compresor.....	46
Figura 12. Perfil de temperaturas del evaporador	47
Figura 13. Balance de materia del habitáculo de un vehículo	48
Figura 14. Descenso de temperatura.....	53
Figura 15. Cabina del vehículo Ford Escape	54
Figura 16. Modelado geométrico de la Cabina del vehículo Ford Escape	54
Figura 17. Volumen interno de la cabina.....	55
Figura 18. Mallado computacional de la cabina	56

Figura 19. Disposición de las rejillas para la salida de aire	56
Figura 20. Selección de los parámetros del aire	58
Figura 21. Identificación de los parámetros del aire.....	59
Figura 22. Identificación de los parámetros de temperatura inicial del fluido	60
Figura 23. Especificación del tipo de convección	61
Figura 24. Especificación de velocidad y temperatura en el Software CDF	62
Figura 25. Ajustes de velocidad y temperatura en el Software CDF.....	62
Figura 26. Salida de aire en la cabina de vehículo en el Software CDF	64
Figura 27. Parámetros presión en el Software CDF	64
Figura 28. Parámetro de tiempo para ejecutar a simulación	65
Figura 29. Distribución de la temperatura en habitáculo del vehículo	65
Figura 30. Distribución frontal de la temperatura.....	66
Figura 31. Temperatura en habitáculo lateral izquierdo	66
Figura 32. Temperatura en habitáculo lateral derecho.....	66
Figura 33. Distribución trasera de la temperatura en habitáculo del vehículo	67
Figura 34. Distribución trasera de la temperatura plano superior del vehículo	67
Figura 35. Flujo del caudal de aire en el eje x.	68
Figura 36. Flujo del caudal de aire en el eje y.	69
Figura 37. Flujo del caudal de aire en el eje z.	69
Figura 38. Temperatura final en el habitáculo del vehículo, eje z.	70
Figura 39. Flujo del caudal de aire en el eje x	70

Figura 40. Temperatura vs el tiempo	71
Figura 41. Temperatura vs el tiempo con mayor inercia	73
Figura 42. Ciclos frigoríficos de la aplicación FRIO.....	74

Introducción

El siguiente trabajo de investigación subyace a realizar un análisis del comportamiento térmico una cabina climatizada mediante simulación CFD en un automóvil tipo SUV Ford Escape. Implementando un diseño inventar para la cabina, se podrá ver la representación del sistema (HVAC) de aire acondicionado del vehículo y sus últimos avances tecnológicos para satisfacer el confort de las personas en el habitáculo del automotor.

Posteriormente se desarrolla un modelo térmico del habitáculo del vehículo para analizar la evolución en el tiempo del flujo de aire frío emitido por el sistema HVAC en consideración de las medidas de eficiencia energética.

En correspondencia con lo anterior, el modelo matemático del sistema de aire acondicionado tiene como fin validar los valores obtenidos en las simulaciones en el software CFD y así determinar los óptimos parámetros de funcionamiento, por lo que se pueda predecir el consumo de combustible en este tipo de vehículo SUV Ford Escape al momento de utilizar el aire acondicionado.

Antecedentes

En el Ecuador, el incremento del parque automotor ha generado un excesivo consumo de combustibles pertenecientes a los derivados del petróleo, logrando así tener un impacto significativamente perjudicial en el medio ambiente debido a que se emite mayor proporción de emanación contaminante por parte del vehículo.

Por otro lado, a consecuencia de los cambios de clima producto de las constantes emanaciones de contaminantes a la atmosfera incide en cambios en altas temperaturas, generando así que en los vehículos nuevos traigan incorporados sistemas de confort térmico denominado aire acondicionado. El mismo presenta la función de controlar la temperatura en el habitáculo del vehículo. Para ello este sistema requiere de cierta potencia procedente del motor de combustión interna que da lugar a un incremento de consumo combustible.

En el caso de Aguirre, en el año 2021, realizó pruebas de recorrido donde se logró contabilizar el gasto de gasolina al usar el sistema de aire acondicionado; cabe mencionar que, los datos obtenidos varían según las condiciones o factores latentes, como la cantidad de tráfico vehicular, cilindraje del vehículo, condiciones climáticas, las condiciones en las que se encuentran las vías, entre otros (Aguirre, 2021).

Por su parte, Mogollón (2016) determina que las constituciones y compendios que gobiernan el dinamismo en el funcionamiento del aire acondicionado, resulta primordial para el perfeccionamiento de un modelo térmico del sistema, conociendo la evolución dinámica de los parámetros más significativos, logrando así tener un mejor hallazgo en el proceso de investigaciones y control de calidad en el conjunto de elementos que conforman el aire del vehículo.

Además, en revisión de la literatura presentada por Da Silva and Melo (2016) mostró que el diseño de un sistema de aire acondicionado automotriz considera varios parámetros como las restricciones de espacio del vehículo, el confort térmico, la durabilidad, el aislamiento, el ruido, la vibración, entre otros. Además, uno de los desafíos en la industria de automóviles es proporcionar confort térmico de forma sostenible y energéticamente eficiente. Debido a las restricciones de costo y tiempo, la industria automotriz ha estado utilizando el enfoque de modelado matemático para predecir la ganancia de los procesos de aire acondicionado automotriz en la industria. Además, existe un creciente cuerpo de literatura que reconoce la importancia del enfoque de modelado matemático aplicado a los sistemas MAC. Por ejemplo, Lee y Yoo (2000) propusieron un modelo matemático para el aire acondicionado de un automóvil y demostraron que se puede utilizar para dimensionar el condensador adecuado para un sistema específico. Jabardo et al. (2002) propusieron un modelo matemático de estado estacionario para un sistema MAC equipado con un compresor de capacidad variable. Las predicciones numéricas se compararon con resultados experimentales con desviaciones

máximas de $\pm 20\%$. Además, Chiang et al. (2014) utilizaron la teoría de redes neuronales para predecir el performance el proceso que sostiene el funcionamiento del aire acondicionado y propusieron estrategias de control capaces de proporcionar confort térmico con bajo consumo de energía.

En los vehículos utilitarios deportivos, el aire acondicionado representa una herramienta a ofrecer un acondicionamiento térmico y una circulación de aire eficiente dentro de la cabina para la comodidad de los pasajeros frente a las diferentes variaciones climáticas (Rojas et al., 2020). El rendimiento de trabajo del proceso implícito del aire acondicionado en autos es un factor esencial para el confort térmico y la seguridad de conducción del habitáculo de los vehículos. Por lo tanto, es de gran importancia formular modelos bajo simulaciones numéricas para análisis teórico y la estimación del rendimiento del aire acondicionado del vehículo SUV. Estas características del campo de flujo interno del aire acondicionado son investigadas por la dinámica de fluidos computacional (CFD) para determinar cómo sería el flujo de aire frío en las rejillas del aire acondicionado y cuál sería la distribución de la velocidad en el área A del parabrisas delantero y el campo de visión del conductor de las ventanas izquierda (Cajo, 2022).

Con base en lo anterior, el fin último de esta investigación, consiste en el desarrollo de un modelo matemático que nos permita validar los datos obtenidos de la simulación de un sistema de flujo de aire acondicionado automotriz tomando en cuenta variables como las condiciones ambientales, la velocidad del compresor, la geometría del dispositivo de expansión y la geometría de los intercambiadores de calor y caudales de aire. El modelo estará diseñado para predecir los principales parámetros del sistema, así como el desempeño energético bajo diferentes condiciones de operación.

Planteamiento del problema

El alto consumo de combustibles que experimenta el parque automotor del Ecuador ha generado significativas implicaciones dañinas tanto al medio ambiente como a la salud de las personas, así como también en la economía de los ciudadanos debido al incremento de los costos en los combustibles (Hidrovo et al., 2016).

Debido al uso del aire acondicionado en el vehículo, este genera un consumo energético en el motor que provoca a su vez un consumo adicional de combustible, por lo que causa más gases contaminantes al momento de utilizar el sistema de aire acondicionado. En este sentido, según Aguirre (2021), el automóvil utilizando gasolina de alta calidad, tanto en situaciones de tráfico con y sin aire acondicionado, presenta un mayor consumo en comparación con el uso de gasolina de calidad regular; por ejemplo, en condiciones de tráfico, el vehículo consume 5,8 km/l con A/C y 6,44 km/l sin A/C con gasolina súper, mientras que con gasolina extra consume 5,51 km/l y 5,96 km/l respectivamente. En condiciones de ausencia de tráfico y con el aire acondicionado activado, el rendimiento del vehículo mejora ligeramente, con la gasolina extra alcanzando 6,53 km/l y la súper 6,29 km/l. Sin embargo, al desactivar el aire acondicionado, la gasolina súper puede llegar a consumir hasta 7,24 km/l como máximo, mientras que la gasolina extra alcanza los 6,60 km/l., por lo que tener conocimiento de estos parámetros no ayudará a determinar cuáles son las condiciones o parámetros para simular un modelo térmico de una cabina de un vehículo (Aguirre, 2021).

Debido a la anterior problemática, se encuentra el registro del aumento en la intensidad de temperatura al medio ambiente producto de los cambios climáticos, esta repercusión de altas temperaturas con llevan a utilizar de forma más habitual el encender el aire acondicionado, lo cual genera en el vehículo deportivo utilitario de la marca Ford Escape (SUV, siglas del inglés Sport Utility Vehicle) un consumo sumamente significativo de combustible. (Kreuzer y Wilmsmeier, 2014)

Obviamente bajo esta realidad, se debe considerar un escenario adicional consistente en evaluar una cabina térmica, con objeto de proponer los ajustes adecuados en el esquema de simplificación en el funcionamiento del aire acondicionado vehicular que permitan garantizar un confort térmico con el mínimo consumo energético. Para su desarrollo y aplicación, es necesario el uso de herramientas de simulación como ANSYS. Una vez que se determina el modelo que permite diseñar de forma óptima la distribución correcta del sistema de aire acondicionado que garantice un mejor confort. Al final, como parte de esta investigación, nuestra simulación va estar validada por un modelo matemático.

Se tiene, entonces, la siguiente pregunta: ¿es posible desarrollar un modelo matemático relativamente simple que represente el comportamiento térmico transitorio de la cabina de un vehículo SUV?

Objetivos

Objetivo General

Simular el comportamiento térmico de una cabina de un vehículo SUV, mediante la utilización de un software CFD (ANSYS).

Objetivos Específicos

- Comprender la fundamentación teórica de los componentes que integran el sistema de aire acondicionado automotriz y determinar las variables que afectan a su funcionamiento.
- Determinar los parámetros que influyen en el comportamiento térmico de la cabina del vehículo SUV Ford Escape que serán utilizados en la simulación CFD.
- Analizar el comportamiento del flujo del aire en la cabina mediante los resultados logrados de la simulación CFD (ANSYS).
- Diseñar un modelo matemático que nos permita comprobar los valores obtenidos de la simulación.

Justificación

Es de interés esencial, desde el punto de vista comercial y social, el estudio del consumo de combustible que genera un vehículo SUV marca Ford Escape al momento de utilizar el sistema de aire acondicionado, como consecuencia del incremento excesivo en la temperatura del medio ambiente.

En este punto es yacente la necesidad de determinar el comportamiento térmico del aire en el habitáculo del vehículo, mediante la aplicación de software CFD que, al simular bajo ciertos parámetros, se puede determinar el óptimo funcionamiento del sistema con el menor consumo de combustible y el mayor confort térmico.

Tal escenario permite la realización de comprobaciones en cuanto a la manera más eficiente para el uso correcto del aire acondicionado en un vehículo utilitario deportivo (SUV) y plasmar cuales son los parámetros por parte del sistema que permitan minimizar el gasto de combustible.

El construir este modelo representa una finalidad sustancial para garantizar un mejor confort a los ocupantes del vehículo mediante un menor consumo energético del motor lográndose la reducción del consumo de combustible. Este escenario tiende a generar un mayor ahorro al propietario del vehículo y principalmente la reducción en producción de contaminantes gaseosos que se emiten al medio ambiente, situación que ha acrecentado considerables cambios climáticos como, por ejemplo, el aumento de temperatura.

Importancia

El desarrollo de un modelo matemático del comportamiento térmico del habitáculo del vehículo SUV marca Ford Escape, presenta absoluta relevancia al permitir determinar parámetros que garanticen el confort térmico de las personas con el mínimo gasto de combustible.

Viabilidad

Con respecto a la viabilidad del desarrollo del proyecto, su ejecución se consolida por medio de la implementación del software CFD denominado ANSYS, que ofrece niveles de confiabilidad en los hallazgos determinantes en la implementación del modelo térmico. Para ello, se analiza varios factores determinantes del performance del sistema para obtener en el sistema los niveles de eficiencia en la operatividad para condiciones temperaturas elevadas que pueden llegar a tener un vehículo utilitario deportivo y específicamente de la marca Ford Escape.

Limitaciones del estudio

El objetivo de estudio es simular el comportamiento térmico de la cabina de un vehículo SUV y su validación mediante un modelo matemático con el fin de obtener el mayor confort térmico sobre el funcionamiento del aire acondicionado vehículo Ford Escape, además de permitir disminuir el gasto de energía que utiliza en el sistema del vehículo y que garantice un confort térmico de los ocupantes del automotor. Para ello, se tiene previsto la utilización de dos aplicaciones que permitan la modelación de la cabina (Inventor) y por medio de la implementación de software ANSYS para obtener una simulación del flujo de aire y así verificar cual es el comportamiento de la cabina. La limitación yacente, se ubica en el caso de no contar con las muestras necesarias que permita la comprobación de la confiabilidad de los hallazgos en función de los datos; por lo tanto, se prevé la implementación de un modelo posteriormente para el vehículo que logre la comprobación física.

Estado del arte

Fundamentación sobre refrigeración

La fundamentación que modela un sistema de calefacción y refrigeración de pasajeros que actualmente tiende a presentar un vehículo deportivo utilitario se centra en evaluar el evaporador y el núcleo del calentador que conforman el proceso asociado con la calefacción y otro relacionado con la refrigeración, respectivamente. El circuito de refrigerante es un período típico de refrigeración por compresión de refrigerante R-134a en un compresor, un condensador, receptor de líquido, válvula de expansión termostática y evaporador (Conesa, 2011).

Concepto de refrigeración

Las concepciones de refrigeración representan procesos termodinámicos asociados con la extracción del calor por tuberías para lograr la disminución de la temperatura de fluidos refrigerantes. También, en el mismo sistema se puede aplicar un proceso de calefacción en el vehículo. Estos dos procesos se consideran como dos conjuntos diferentes de componentes que se combinan dentro del vehículo para producir la temperatura deseada. Estos ciclos del medio circulante son el ciclo aire acondicionado (A/C) y el ciclo del calentador (Serrano y Corredor, 2022). El ciclo del aire acondicionado y el ciclo del calentador comparten algunos componentes comunes: ambos están montados dentro del módulo de calefacción y refrigeración y utilizan el ventilador del módulo para hacer circular el aire caliente o frío. También comparten los mismos conductos y rejillas de ventilación que se utilizan para enviar el aire frío o caliente al habitáculo (Kargilis, 2003).

En términos de la concepción de la terminología de refrigeración es yacente con los sistemas de aire acondicionado que cumplen ciertos roles fundamentales asociados con la comodidad de las personas, y su empleo es de gran importancia en la refrigeración industrial para el acondicionamiento de productos orgánicos e inorgánicos.

Ciclos de refrigeración

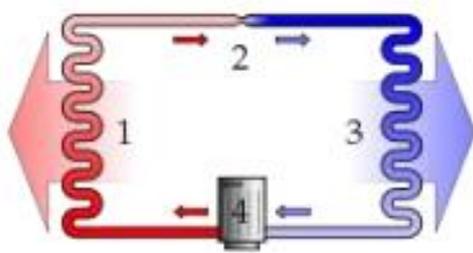
La explicación clásica del ciclo de refrigeración, implica un transporte del calor desde el habitáculo hacia el medio ambiente. Por ejemplo, a nivel doméstico el refrigerador representa una interpretación sencilla para explicar el proceso de funcionamiento, en el cual se traslada el calor fuera del interior y dentro de su entorno (vehículo o habitación) (Villamil y Piamba, 2005).

El vapor de refrigerante circulante ingresa al compresor (ubicado en el compartimento del motor) y mediante procesos de compresión a una presión sumamente alta, lo que también da como resultado una temperatura más alta. El gas del refrigerante que se ha calentado y con una alta compresión se presenta en este punto a una temperatura y presión a las que se está sujeta a la condensación por medio de un condensador, ubicado en la cara frontal del radiador para el vehículo. En este último paso, el refrigerante suele enfriarse con el aire para continuar el proceso de fluir hacia las bobinas del condensador y se concentra a estado líquido. Por lo tanto, el refrigerante circulante se repela el calor inminente en el sistema de refrigeración producto del aire (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Según Agarwal and Ekhlak (2018), el refrigerante líquido condensado y presurizado se dirige por medio de una válvula de expansión donde soporta descenso abrupto de la presión. Esa disminución de presión del gas refrigerante conduce a la evaporación instantánea de porción del gas refrigerante en estado líquido, disminuyendo la temperatura. Luego, el proceso continúa con el refrigerante frío dirigiéndose al evaporador ubicado en el compartimiento de pasajeros. El aire (que debe enfriarse) sopla por las rejillas del evaporador, produciendo que la fracción líquida en mezcla fría de gas refrigerante también produzca evaporación, lo que minimiza considerablemente la temperatura, ocasionando que todo el aire caliente se enfríe (ver Figura 1). El último proceso, se cumple cuando el vapor del gas refrigerante se reintegra la estructura del compresor.

Figura 1.

Diagrama simple de un sistema de refrigeración



Nota. Tomado de (Agarwal & Ekhlak, 2018)

Donde:

- 1) Serpentín de condensación,
- 2) válvula de expansión,
- 3) Serpentín del evaporador,
- 4) Compresor.

2. Refrigeración por evaporación

Descripción del sistema de aire acondicionado

Los sistemas de A/C son bastante complejo y se instala de fábrica con un sistema complejo de distribución del flujo en el aire completamente automático. En este punto el conductor establece la temperatura deseada, los controles mantienen la temperatura dentro de los límites máximos de enfriamiento a máximo de calefacción con el equilibrio adecuado entre enfriamiento, calefacción y velocidad del ventilador (Sanz y Sanz, 2014).

Sistema de distribución de aire acondicionado automotriz

El sistema de distribución de aire es básicamente un sistema mecánico y consta de ventiladores para eliminar el aire, conductos para transportar el aire y válvulas para controlar el flujo de aire (Martín et al., 2011). Los ventiladores son accionados por motores eléctricos y las válvulas de aire son ajustadas por los ajustadores de vacío o por medios mecánicos. El

sistema de distribución de aire difiere entre los fabricantes de automóviles, modelos y tipos de acondicionadores de aire. Sin embargo, se dividen en tres tipos básicos de sistemas para aires acondicionados de vehículos (Tencio, 2016).

El tipo de acondicionador de aire frecuentemente común es autónomo y su sistema de distribución de aire está completamente separado del sistema de calefacción del automóvil. En este caso, el flujo de aire por las rejillas está controlado por la rapidez del soplador y las persianas controlan la orientación en la salida del aire (Conesa, 2011).

El segundo tipo de acondicionadores para aires instalados en fábrica son construidos para combinar dos sistemas relacionados con la distribución del aire frío con la distribución de aire caliente. Una combinación de procesos de refrigeración, que elimina la humedad y la suciedad, seguida del recalentamiento deseado, proporciona un aire acondicionado ideal. El recalentamiento tiene lugar, si el aire se enfría más en el evaporador, dirigiendo parte o todo el aire frío a través del núcleo del calentador (Bonilla, 2015).

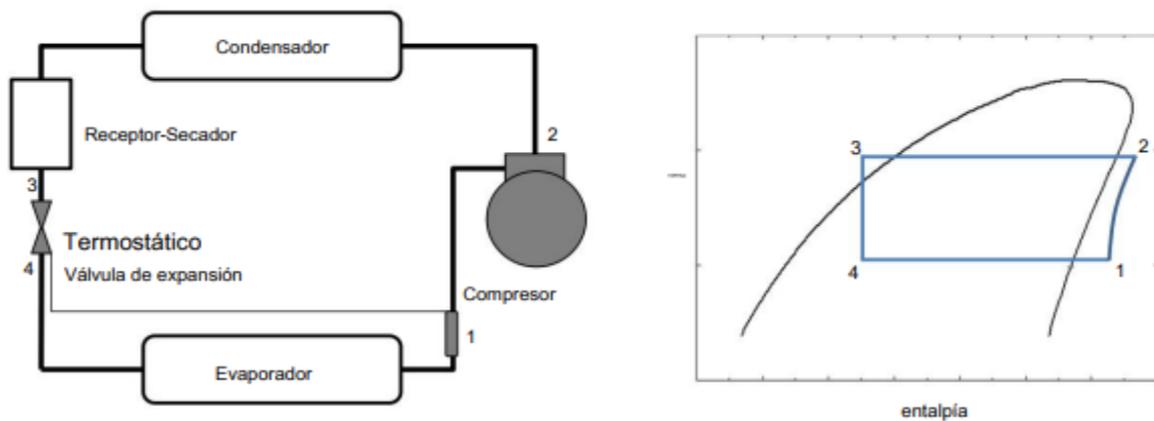
Compresor

En la Figura 2 se muestra un sistema típico de receptor-secador de válvula de expansión termostática (TXV-RD) utilizado por la industria automotriz y su correspondiente diagrama de presión-entalpía. El ciclo comienza con la compresión del fluido refrigerante en fase de vapor que sale del evaporador en la posición 1 que se encuentra representada en la figura. Durante el proceso de compresión, la temperatura del vapor refrigerante aumenta a un valor superior a la temperatura del entorno. El refrigerante sobrecalentado que sale del compresor en la posición 2 fluye hacia el condensador y transfiere calor a los alrededores para convertirse en líquido. El líquido a alta presión se acumula en el receptor-secador, que permite que solo fluya refrigerante líquido a la válvula de expansión termostática, como lo indica la posición 3 (Rojas y Segovia, 2011; Carvajal et al., 2010).

A continuación, el refrigerante líquido se expande a través de la válvula termostática, que regula el caudal másico según el sobrecalentamiento del refrigerante medido a la salida del evaporador. Finalmente, el refrigerante bifásico de baja presión que sale de la válvula de expansión termostática en la posición 4 fluye a través del evaporador, intercambia calor con el flujo de aire externo y vuelve al estado termodinámico inicial del ciclo. Mientras el aire fluye por el lado externo del evaporador, su temperatura y humedad se reducen. El aire frío y seco, que sale del evaporador, luego circula hacia el compartimento de pasajeros (Belman, 2008).

Figura 2.

Representación esquemática de un sistema TXV-RD y su correspondiente diagrama de presión-entalpía.



Nota. Tomado de (Belman, 2008).

El compresor de aire acondicionado generalmente es operado por el motor del vehículo por medio de una correa trapezoidal acanalada. El compresor comprime y transporta el refrigerante en el sistema. Actualmente existen diferentes diseños de compresores disponibles (Leiton, 2022).

Condensadores

Los condensadores son vitales para templar el gas refrigerante que se calienta por el proceso de compresión. El gas refrigerante en estado caliente tiende a fluir hacia el condensador y traslada calor al entorno por medio de las tuberías y las aletas. A medida que se enfría, el estado del refrigerante vuelve a cambiar de gaseoso a líquido (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Figura 3.

Condensador



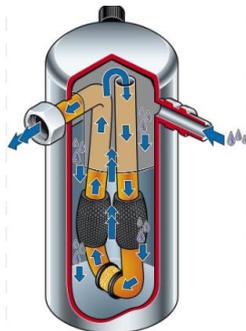
Nota. Tomado de (Deyac, 2024)

Secador de filtro

Son los secadores, los filtrantes del sistema de A/C, también se han denominados filtros secadores o acumuladores, según el tipo de sistema. La tarea del filtro secador es eliminar las impurezas del refrigerante y deshumidificarlo (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Figura 4.

Filtro secador



Nota. Tomado de (Infotaller, 2024)

Válvula de expansión

Una válvula de expansión representa el sitio de disociación entre los dispositivos de alta y baja presión en el proceso refrigerante. Se instala aguas arriba del evaporador. En garantía de lograr una capacidad de refrigeración óptima en el evaporador que, en términos a la temperatura, el incremento o disminución de la circulación del gas refrigerante es controlada por la válvula de expansión. Como resultado, se asegura la gasificación absoluta del refrigerante en estado líquido y seguidamente, el refrigerante en estado de gas entra al compresor. Por ende, existe diferentes válvulas de expansión según la forma como se diseña (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Figura 5.

Válvula de expansión



Nota. Tomado de (Intersam, 2024)

Evaporador

El evaporador se utiliza para intercambiar lo caliente del refrigerante con el aire en condiciones que se presentan en el ambiente y el refrigerante en el sistema de aire acondicionado (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Figura 6.*Evaporador*

Nota. Tomado de (Capital Refrigeracao, 2024)

Interruptor de presión

Los interruptores de presión son responsables de resguardar sistema de A/C contra deterioros causados por presiones demasiado altas o demasiado bajas. Hay presostatos de baja, presostatos de alta e interruptores trinarios. El presostato trinario comprende el presostato de alta y el presostato de baja y un contacto interruptor adicional para el condensador admirador (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Figura 7.*Interruptor de presión*

Nota. Tomado de (Bingo, 2024)

Ventilador de ventilación

El ventilador de ventilación se utiliza para ventilar el automóvil de pasajeros. Garantiza una visibilidad clara y un clima interior agradable. Principales requisitos previos para una conducción segura y cómoda (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Ventilador del condensador

El ventilador del condensador ayuda a garantizar la licuefacción óptima del refrigerante sin importar en qué estado de funcionamiento se encuentre el vehículo. Se monta aguas arriba o aguas abajo del condensador y/o del sistema de refrigeración del motor como ventilador adicional o combinado (Agarwal & Ekhlak, 2018).

Figura 8.

Ventilador del condensador



Nota. Tomado de (UPIC, 2024)

Refrigerantes

Siendo los refrigerantes fluidos que permiten la absorción del calor a bajos niveles de temperatura y presión que cambian su estado en cada etapa del proceso. Siendo estos por su naturaleza nocivos para la salud y el medio ambiente (ASHRAE, 2001).

El rápido cambio de CFC-12 a HFC-134a fue una decisión global tomada por todos los fabricantes de automóviles en los países desarrollados. El primer sistema HFC-134a se instaló en 1990 y en 1994 casi todos los vehículos vendidos en países desarrollados usaban este

refrigerante. En los países en desarrollo, la transición de CFC-12 a HFC-134a se completó en el año 2008 (ASHRAE, 2001).

Adicionalmente, en la actualidad, solo se producen cantidades relativamente pequeñas de HFC-152a en todo el mundo; el principal fabricante está en los EE.UU (SEMARNAT, 2019). Existen tres fabricantes que producen pequeñas cantidades en China y uno en Japón. Habría que desarrollar la capacidad de producción para que el HFC-152a se utilice en los sistemas MAC y, con la inversión de capital necesaria, esto tardaría varios años en lograrse. Debido al procesamiento más simple, el HFC-152a debería costar menos que el HFC-134a.

HFC-152a es un gas moderadamente inflamable y está listado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) Norma 34 (ASHRAE, 2001) como refrigerante de Clase A2, definido como de menor inflamabilidad que la Clase A3 (hidrocarburos como el propano). Como referencia, el HFC-134a es de Clase A1, de baja toxicidad y no inflamable. La inflamabilidad del HFC-152a probablemente requerirá funciones de seguridad adicionales (Rodríguez, 2020).

Los sistemas HFC-134a y los sistemas CFC-12 que reemplazaron, se consideran seguros para el uso previsto. Los sistemas de refrigerante de reemplazo también deben proporcionar un nivel comparable de seguridad tanto para los ocupantes del vehículo como para los técnicos de servicio. El último borrador de SAE J639 (SAE, 1999) proporciona un ejemplo de las condiciones que deben cumplirse para un diseño seguro. Por ejemplo, para los refrigerantes contenidos en componentes que están ubicados dentro del compartimiento de pasajeros, o en contacto directo con el flujo de aire del compartimiento de pasajeros (por ejemplo, evaporadores y tuberías y accesorios asociados), el diseño del sistema debe ser tal que no sea dañino ni dañino. Una condición inflamable resultará de una liberación de refrigerante en el compartimiento de pasajero (Rodríguez, 2020).

Cargas térmicas del vehículo

El libro *Handbook of Fundamentals* de ASHRAE (1988) proporciona dos metodologías principales para calcular carga térmica: Método de balance de calor (HBM) y Método de factor de ponderación (WFM). HBM es el método disponible científicamente más riguroso y puede considerar más detalles con suposiciones menos simplificadoras. Una ventaja de HBM es que se pueden incorporar varios modelos fundamentales en los cálculos térmicos. Aunque HBM es más preciso que WFM, es más fácil implementar WFM para el cálculo de carga en un vehículo de pasajeros. Sin embargo, cuando hay disposiciones en informaciones minuciosa sobre la carrocería del vehículo y las cargas térmicas, HBM es la opción preferida (Kamar et al, 2012). El artículo de Pedersen et al. (1997) ha presentado una formulación completa de un procedimiento de balance de calor para determinar las cargas de enfriamiento.

A partir de este documento, se estudia cómo se formula el balance de calor para calcular la carga de enfriamiento. En este punto, Zheng et al. (2011) idearon un método simple para calcular las cargas térmicas del vehículo. Calcularon las diferentes cargas, como la radiación y las cargas ambientales. Se realizó un estudio de caso y los resultados se validaron mediante pruebas de climatización en túnel de viento. Las diferentes cargas se calcularon por separado y se sumaron para dar el ingreso o merma total de calor de la cabina. Ergonomía del entorno térmico: determinación de la producción de calor metabólico (ISO Standard, 2004) proporciona la tasa de producción de calor metabólico de los pasajeros en función de varios criterios, como la ocupación y los niveles de actividad. Según Zhang et al. (2009) analizó la temperatura y el campo en los flujos para el aire dentro del compartimiento de pasajero para mejorar las comodidades y disminuir el consumo de energía.

Tipos de cargas térmicas

Se consideró una modelización agrupada en el habitáculo del vehículo para el cálculo de la carga térmica. Varias cargas actúan sobre la cabina del vehículo y se clasifican en nueve

categorías diferentes. La suma de todos los tipos de carga será la ganancia de carga de calor total instantánea de la cabina (Vinofer & Rajakumar, 2016). La formulación matemática del modelo se puede resumir como:

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{Met} + \dot{Q}_{Dir} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{Exh} + \dot{Q}_{Eng} + \dot{Q}_{Ven} + \dot{Q}_{AC} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

\dot{Q}_{Tot} : Carga total (W)

\dot{Q}_{Met} : Carga metabólica (W)

\dot{Q}_{Dir} : Carga de radiación solar (W)

\dot{Q}_{Amb} : Carga ambiental (W)

\dot{Q}_{Exh} : Carga escape (W)

\dot{Q}_{Eng} : Carga motor (W)

\dot{Q}_{Ven} : Carga ventilación (W)

\dot{Q}_{AC} : Carga AC (W)

En la práctica, se presentan diferentes condiciones de carga térmica que se localizan en una cabina de un vehículo característico. Algunas de las cargas anteriores pasan a través de las placas/piezas de la carrocería del vehículo, mientras que otras son independientes de la superficie (Vinofer & Rajakumar, 2016).

Carga metabólica: Cuantía que supone aporte térmico de calor por el aire que ingresa en el habitáculo del vehículo (Vinofer & Rajakumar, 2016). La carga metabólica puede ser calculada por:

$$\dot{Q}_{Met} = \sum_{Pasajeros} MA_{Du} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

\dot{Q}_{Met} : Carga metabólica (W)

$\Sigma_{Pasajeros}$: Sumatoria de pasajeros

M: Calor metabólico (w/m²)

A_{Du} : Superficie corporal (kg*m)

$$A_{Du} = 0.202W^{0.425}H^{0.725} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

A_{Du} : Superficie corporal (kg*m)

W: Peso (kg)

H: Altura (m)

Carga de Radiación Solar: es un tipo de radiación directa o solar incidente que concisamente sobre un área superficial del vehículo (Vinofer & Rajakumar, 2016), se calcula a partir de:

$$\dot{Q}_{Dir} = \Sigma_{Superficie} S \tau \dot{I}_{Dir} \cos \theta \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

\dot{Q}_{Dir} : Carga de radiación solar (W)

$\Sigma_{Superficie}$: Sumatoria de superficie (m²)

S τ : Transmisión de temperatura (°C)

\dot{I}_{Dir} : Radiación difusa (W/m²)

La radiación difusa o radiación solar indirecta de la luz del día en el área superficial del vehículo que comúnmente se recibe en un día nublado (Vinofer & Rajakumar, 2016). La ganancia de calor por radiación difusa se encuentra por:

$$\dot{I}_{Dir} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin \beta}\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

\dot{I}_{Dir} : Radiación difusa (W/m²)

A: Área (m²)

B: Tipo de Material

$$\dot{Q}_{Dif} = \sum_{Superficie} S \tau \dot{I}_{Dif} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

\dot{Q}_{Dir} : Carga de radiación solar (W)

$\sum_{Superficie}$: Sumatoria de superficie (m²)

S τ : Transmisión de temperatura (°C)

\dot{I}_{Dir} : Radiación difusa (W/m²)

$$\dot{I}_{Dir} = C \dot{I}_{Dir} \frac{1 + \cos \sum Superficie}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

\dot{I}_{Dir} : Radiación difusa (W/m²)

C: Calor (cal)

$\sum_{Superficie}$: Sumatoria de superficie (m²)

$$\dot{I}_{Ref} = (\dot{I}_{Dir} + \dot{I}_{Dif}) \rho_g \frac{1 - \cos \sum Superficie}{2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

\dot{I}_{Ref} : Radiación reflejada (W/m²)

\dot{I}_{Dir} : Radiación difusa (W/m²)

p : Densidad del material (Kg/m³)

$\sum_{Superficie}$: Sumatoria de superficie (m²)

La radiación reflejada se describe con respecto al incremento del calor por radiación que se refleja desde el suelo y golpea las superficies de la carrocería del vehículo (Vinofer & Rajakumar, 2016).

$$\dot{Q}_{Ref} = \sum_{Superficie} S\tau\dot{I}_{Ref} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

\dot{Q}_{Ref} : Carga de radiación reflejada (W)

$\sum_{Superficie}$: Sumatoria de superficie (m²)

St : Transmisión de temperatura (°C)

\dot{I}_{Ref} : Radiación reflejada (W/m²)

Carga ambiental: el aumento del calor indica que el efecto de los datos meteorológicos es muy importante, ya que el cambio en la temperatura ambiente afecta el cálculo de las cargas de refrigeración externa e interna.

$$\dot{Q}_{Amb} = \sum_{Superficie} ST(T_s - T_i) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

\dot{Q}_{Amb} : Carga ambiental (W)

$\sum_{Superficie}$: Sumatoria de superficie (m²)

ST : Transmisión de temperatura (°C)

Ts: Temperatura externa (°C)

Ti: Temperatura interna (°C)

Carga de escape: Los vehículos tienen motores de ignición interna producen cuantioso gas de escape. Los gases de escape a alta temperaturas pueden contribuir a la ganancia térmica de la cabina a través del suelo de la cabina (Vinofer & Rajakumar, 2016).

$$\dot{Q}_{Exh} = S_{Exh}K(T_{Exh} - T_i) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

\dot{Q}_{Exh} : Carga de escape (W)

S_{Exh} : Superficie del tubo de escape (m²)

K : Coeficiente de transferencia de calor (cal)

T_{Exh} : Temperatura del tubo de escape (°C)

Ti: Temperatura interna (°C)

$$T_{Exh} = 0.138RPM - 17 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

T_{Exh} : Temperatura del tubo de escape (°C)

RPM: Revoluciones por minuto

Carga del Motor: El cálculo de la carga del motor debe tenerse en cuenta en condiciones de funcionamiento severas de la instalación del motor, como alta potencia del motor, baja velocidad del vehículo y/o temperaturas ambiente altas. La capacidad de

transferencia de calor del radiador depende de la temperatura del aire ambiente (Vinofer & Rajakumar, 2016).

$$\dot{Q}_{Eng} = S_{Eng}k(T_{Eng} - T_i) \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

\dot{Q}_{Eng} : Carga del motor (W)

S_{Eng} : Superficie del Motor (m²)

K : Coeficiente de transferencia de calor (cal)

T_{Eng} : Temperatura del motor (°C)

T_i : Temperatura interna (°C)

$$T_{Eng} = -2 \times 10^{-6} RPM^2 + 0.0355 RPM + 77.5 \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

T_{Eng} : Temperatura del motor (°C)

RPM: Revoluciones por minuto

Carga de ventilación: No es eficiente usar aire ambiente caliente para ventilación cuando se requiere enfriamiento (Vinofer & Rajakumar, 2016):

$$Q_V = V_r C \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

Q_V : Carga de ventilación (W)

V_r : Velocidad del aire (m/s)

C : Caudal del aire (m³/s)

ΔT : Intervalo de Temperatura (°C)

Carga de CA: la carga de CA se utiliza para mantener la comodidad en las condiciones de conducción. Varias estimaciones de cargas térmicas en las cabinas de los vehículos pueden ser una evaluación de los cambios dinámicos en las cargas de CA que ocurren en condiciones severas (Vinofer & Rajakumar, 2016).

$$\dot{Q}_{AC} = (\dot{Q}_{Met} + \dot{Q}_{Dir} + \dot{Q}_{Dif} + \dot{Q}_{Ref} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{Exh} + \dot{Q}_{Eng} + \dot{Q}_{Ven}) - (m_a C_a + DTM) \frac{(T_i - T_{comf})}{t_c} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

\dot{Q}_{AC} : Carga AC (W)

\dot{Q}_{Met} : Carga metabólica (W)

\dot{Q}_{Dir} : Carga de radiación solar (W)

\dot{Q}_{Dif} : Carga difusa (W)

\dot{Q}_{Ref} : Carga de radiación reflejada (W)

\dot{Q}_{Amb} : Carga ambiental (W)

\dot{Q}_{Exh} : Carga escape (W)

\dot{Q}_{Eng} : Carga motor (W)

\dot{Q}_{Ven} : Carga ventilación (W)

$m_a C_a$: Masa de la cabina (kg)

DTM: Promedio de temperatura del ambiente (°C)

T_i : Temperatura interna (°C)

$T_{confort}$: Temperatura de confort (°C)

T_c : Temperatura constante (°C)

$$t_c = \frac{t_p}{\ln|T_0 - T_{comf}|} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

Tc: Temperatura constante (°C)

tp: Tiempo promedio (°C)

To: Temperatura inicial (°C)

Tconfort: Temperatura de confort (°C)

Funcionamiento del compresor

En el presente estudio se consideró un compresor de tipo recíprocante con un desplazamiento volumétrico (dv), una velocidad del eje del compresor (n_{comp}). Para el modelo del compresor es importante determinar las ecuaciones gobernantes de las eficiencias (curvas de eficiencias), en este caso se va a determinar estas ecuaciones a partir de datos experimentales de eficiencias para el compresor A/C de R134a obtenidos en *Experimental comparison of mobile A/C systems when operated with transcritical CO2 versus conventional R134a* (McEnaney et al., 1998). De acuerdo con McEnaney et al. (1998), es posible representar la eficiencia volumétrica e isoentrópica en función de la relación de presiones, según datos experimentales del compresor (Belman et al., 2013).

Para este sistema se cuenta con datos experimentales para la representación de la eficiencia volumétrica (n_{vol}), en función de la relación de presiones. La relación de presiones (r_p) se define con la siguiente ecuación:

$$r_p = \frac{P_{descarga}}{P_{succión}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

r_p : Relación de presión (N/m²)

P_{descarga} : Presión de descarga del compresor (N/m^2)

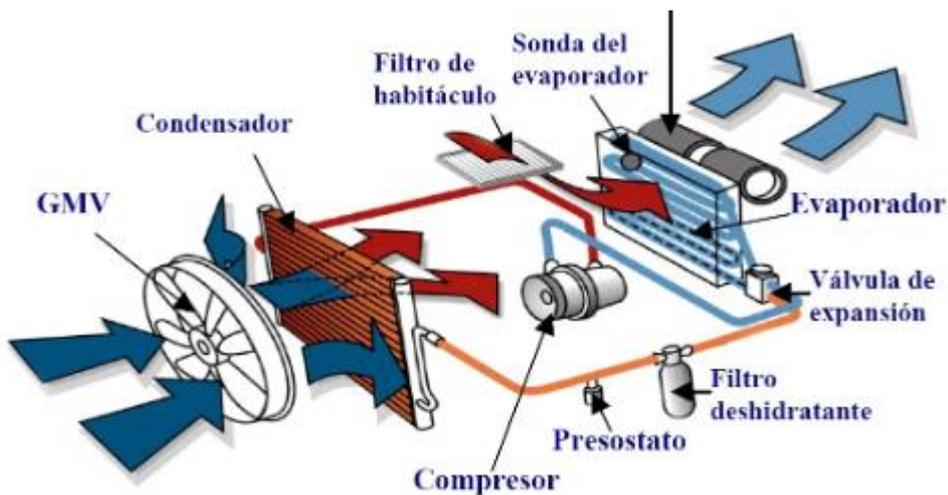
$P_{\text{succión}}$: Presión de evaporación (succión del compresor). (N/m^2)

Consumo de energía

En un automóvil moderno, el sistema de aire acondicionado utilizará alrededor de 4 caballos de fuerza (3 kW) de la potencia del motor, lo que aumentará el consumo de combustible del vehículo (Agarwal y Ekhlak, 2018).

Figura 9.

Sistema del compresor



Nota. Tomado de (Endado, 2024)

Curva de funcionamiento del compresor

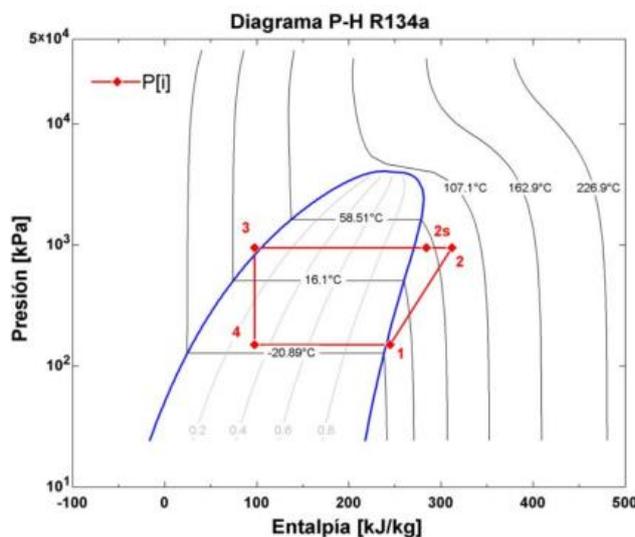
Según Widman y Linares (2008), con la adaptación de condiciones de operación, las características geométricas de intercambiadores y compresor, acorde a un sistema real según McEnaney et al. (1998), son absolutamente pertinentes para analizar el modelo en lo que refiere al ciclo termodinámico y a los perfiles de temperatura de los intercambiadores, con el fin de corroborar todos los fundamentos científicos que implica el modelo. A continuación, se

muestra la representación del ciclo y perfiles de temperatura de los intercambiadores bajo condiciones intermedias de funcionamiento, es decir, condiciones de ciudad y con flujo de aire hacia el evaporador de $0,0826 \text{ m}^3/\text{s}$ y con una temperatura del habitáculo de $39.595 \text{ }^\circ\text{C}$ y temperatura ambiente de $20.085 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la Figura 10 se muestra el comportamiento del sistema bajo las condiciones antes mencionadas, con una temperatura de evaporación de $-17.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y temperatura de condensación de 37.61°C , en lo que compete al ciclo termodinámico del refrigerante estos valores obtenidos indican una correcta elaboración y ejecución del modelo porque no se observan comportamientos extraños ni propiedades extremas que causen inestabilidad en los resultados.

Figura 10.

Representación gráfica del ciclo termodinámico del modelo sobre un diagrama P-H con R134a.



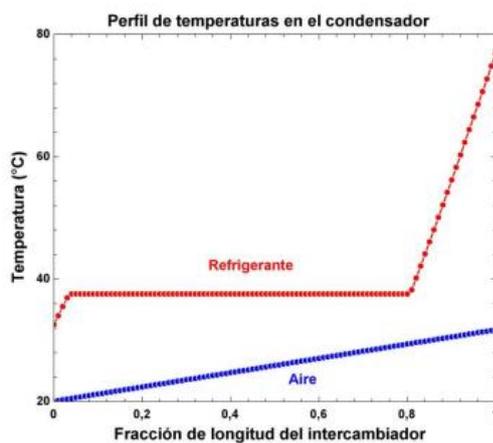
Nota. Tomado de (Widman & Linares, 2008)

Para determinar un correcto comportamiento del condensador se analiza su perfil de temperaturas, se observa en la Figura 2-3 el cambio de la temperatura del refrigerante y del aire a lo largo de su paso por el condensador.

En la Figura 11, se puede observar un perfil temperatura como se planificó para el modelado del condensador, se puede diferenciar fácilmente en el refrigerante las tres zonas: recalentamiento, condensación, y subenfriamiento. Con una temperatura de entrada y salida del fluido de 76.91°C y 32.61°C respectivamente y un SC de 5 K, en cuanto al aire se tiene una temperatura de entrada de 20.09°C y sale a 31.75°C . Esto da indicios del correcto desempeño del modelo en lo que refiere a fundamentos de transferencia de calor.

Figura 11.

Perfil de temperatura en el compresor.

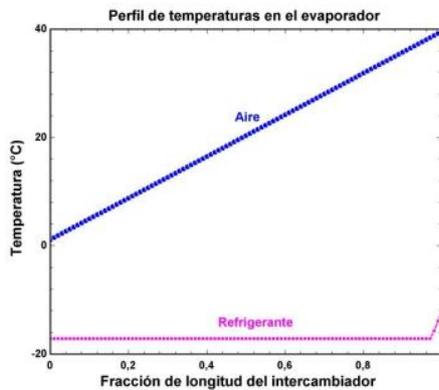


Nota. Tomado de (Widman & Linares, 2008)

Se observa en la Figura 12, el perfil de temperaturas del evaporador y se distingue claramente la zona de evaporación y sobrecalentamiento, las cuales fueron claramente definidas en el capítulo anterior, con una temperatura de entrada y salida del fluido de -17.1°C y -12.1°C respectivamente y un SH de 5 K. Además del comportamiento de la temperatura del aire con una temperatura de entrada y salida de 39.6°C y 1.153°C respectivamente.

Figura 12.

Perfil de temperaturas del evaporador



Nota. Tomado de (Widman & Linares, 2008)

METODOLOGÍA

Diseño metodológico de la investigación

El presente trabajo de titulación se aplicó un método de investigación inductivo que determina las características principales del sistema A/C automotriz, al igual que se sustenta la presente investigación por medio de la descripción documental y el análisis de los principios teóricos en cuanto a funcionamiento del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) de un vehículo SUV marca Ford Escape y sus componentes.

Simulación CFD del comportamiento térmico de la cabina

La ventaja de los desarrollos tecnológicos crea una mejoría para la caracterización del funcionamiento del sistema (HVAC) para modelo de vehículo SUV marca Ford escape, en comparación a la implementación de metodologías tradicionales de prueba física. Es en este punto que surge los softwares CFD para simulación de la dinámica de fluidos que minimizan el tiempo de experimentación y el ajuste en los parámetros, que según Reda et al. (2017) son

necesarios para el desarrollo de los sistemas de climatización automotriz, contribuir a mejorar su rendimiento y proporcionar una mejor comprensión de los procesos subyacentes.

Este método es particularmente aplicable cuando las mediciones en el vehículo han de ser difíciles o imposibles de realizar, y donde los métodos de ingeniería tradicionales no funcionan (Grundstein et al., 2009). Además, este uso requiere una buena definición del objeto probado (condiciones de contorno) y validación del modelo. El modelado CFD es una herramienta útil para la optimización de sistemas HVAC para cabinas desde la perspectiva de los requisitos del usuario.

En general, un análisis CFD típico consta de tres pasos (Villagran y Bojacá, 2018):

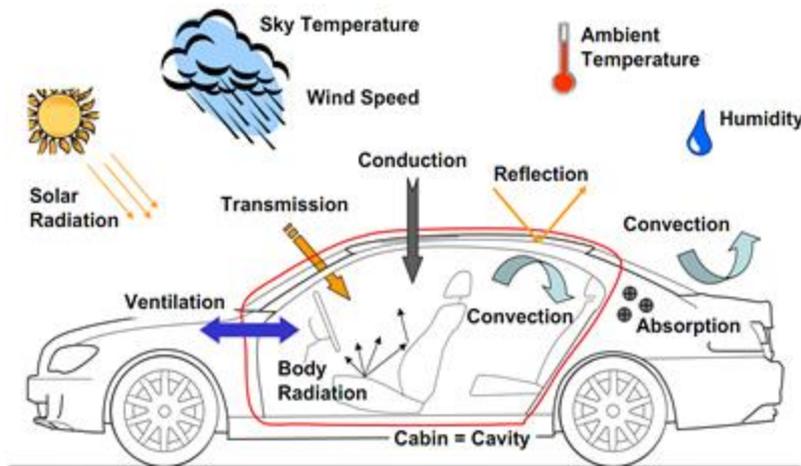
- 1.- Pre procesamiento
- 2.- Ejecución de la simulación
- 3.- Pos procesamiento y análisis de resultados.

Desarrollo del modelo matemático

El desarrollo de un modelo matemático transitorio basado en el balance de materia y energía del habitáculo del vehículo. Tal como se puede observar en la Figura 13, el habitáculo presenta múltiples entradas de flujos de materia y energía que deben ser considerados en el modelo.

Figura 13.

Balance de materia del habitáculo de un vehículo



Nota. Tomado de (Reda et al., 2017)

En dicho modelo se han considerado variables como la temperatura ambiente, la irradiación solar, la temperatura inicial del habitáculo del vehículo, caudal de aire, coeficiente de by-pass de ventilación, dimensiones y geometría de la cabina y características del compresor del sistema de climatización automotriz del vehículo.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Balance de materia y energía del habitáculo del vehículo

En un sistema de aire acondicionado automotriz es sumamente importante determinar el balance de materia y energía ya que permite analizar el funcionamiento del mismo sistema, con el fin de verificar la estabilidad de proceso ya que va estar determinado por distintos factores para su correcto trabajo, los cuales tienen cumplir con el concepto de que la materia que entra en un sistema es la misma que sale, el cual nos garantiza un equilibrio.

El balance de materia y energía de nuestro sistema de aire acondicionado automotriz se puede representar mediante la ecuación del balance de energía que se muestra a continuación:

$$k_1 \frac{dT}{dt} = k_2 T_e - k_2 T + k_3 - q \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

T: Temperatura medio del interior de la cabina ($^{\circ}\text{C}$).

t: Tiempo (s)

q: Potencia del sistema de aire acondicionado (kW)

k1: Coeficiente de inercia térmica ($\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$)

k2: Coeficiente de ganancias energéticas por conducción y convección en ($\text{kW}/^{\circ}\text{C}$)

k3: Coeficiente de ganancias energéticas por irradiación solar (kW)

Para la determinación de los coeficientes de energía k1, k2 y k3 se utilizarán los datos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Datos para la determinación de los coeficientes k1, k2 y k3 del balance de energía

Datos de Balance de energía		
Volumen Cabina (v)	5,1945	m^3
Densidad del aire (d)	1,16	kg/m^3
Temperatura Externa (Te)	31.9	$^{\circ}\text{c}$
Caudal (Q)	0,5	kg/s
Radiación solar	800	W/m^2
Calor Especifico (Cp)	1,007	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{c}$
Convección (h)	25	w/m^2
Área externa de la cabina (Ac)	12,2	m^2
Potencia aire acondicionado (q)	10	Kw
Coeficiente bypass γ	0,5	
Coeficiente absorción solar α	1	

Área vidrio (Av)	2,5	m ²
Tempe inicial cabina (T ca)	32	°C

Cálculo del coeficiente k1

Para determinar la constante 1 se utiliza el volumen de la cabina (v), la densidad del aire y el calor específico (CP) en la siguiente ecuación:

$$k_1 = v * d * CP \quad \text{Ecuación 20}$$

$$k_1 = 5,1945 \text{ m}^3 * 1,16 \text{ kg/m}^3 * 1,007 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$k_1 = 6,28 \text{ kJ/} ^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 22}$$

Cálculo de la constante 2 (k2)

La constante 2 la vamos a calcular utilizando los valores de caudal (m), el calor específico (CP), el coeficiente (y), la convección (Ac) y el área de la cabina (Ac).

$$k_2 = (\gamma \cdot Q \cdot Cp + (h \cdot Ac))/1000 \quad \text{Ecuación 23}$$

$$k_2 = (0,5 * 0,5 \text{ kg/s} * 1,007 \text{ kJ/kg} ^\circ\text{C} + (25 \text{ W/m}^2 * 12,2 \text{ m}^2))/1000 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$k_2 = 0,557 \text{ kW/} ^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 25}$$

Calculo de la constante 3 (k3)

En relación a la constante 3 los valores que se utiliza son la radiación solar (I), el área del vidrio (Av) y el coeficiente de absorción α .

$$k_3 = (\alpha \cdot I \cdot A_v)/1000 \quad \text{Ecuación 26}$$

$$k_3 = (0,5 * 800 \text{ W/m}^2 * 2,5 \text{ m}^2)/1000 \quad \text{Ecuación 27}$$

$$k_3 = 1 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 28}$$

Cálculo de la temperatura con respecto al tiempo

Una vez determinada las tres constantes e integrada la ecuación diferencial podemos a calcular el descenso de la temperatura de la cabina mientras transcurre un determinado tiempo mediante la siguiente ecuación:

$$T = T_e + \frac{k_3 - q}{k_2} - \left[T_e - T_{ih} + \frac{k_3 - q}{k_2} \right] e^{-\frac{k_2 t}{k_1}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

T: Temperatura promedio del interior de la cabina (°C).

Te: Temperatura externa (°C).

Tin: Temperatura interna (°C).

t: Tiempo (s)

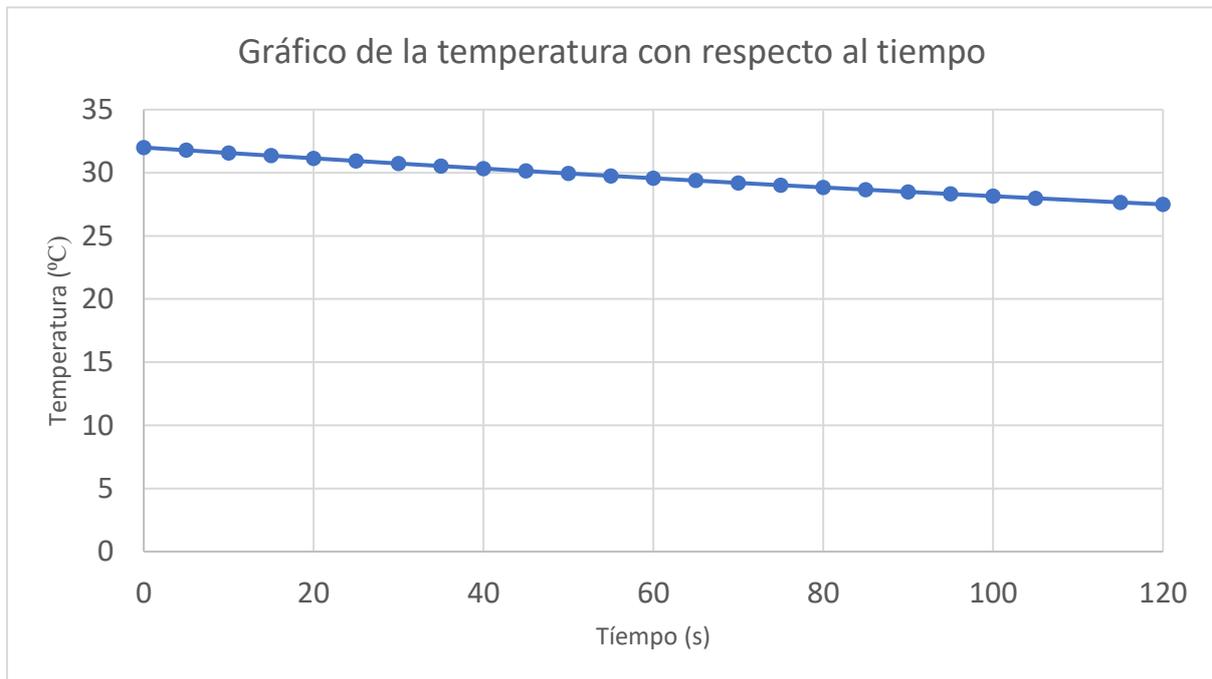
q: Potencia del sistema de aire acondicionado (kW)

k1: Coeficiente de inercia térmica (kJ/°C)

k2: Coeficiente de ganancias energéticas por conducción y convección en (kW/°C)

k3: Coeficiente de ganancias energéticas por irradiación solar (kW)

En el tiempo 0 la temperatura tendrá un valor de 32 °C que corresponde a la temperatura inicial de la cabina (T_{ih}). Seguidamente reemplazamos los valores del tiempo en nuestra ecuación, obteniendo los siguientes valores representados en la **Figura 14**.

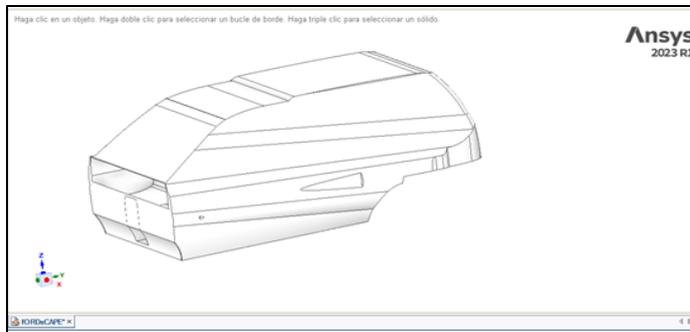
Figura 14.*Descenso de temperatura*

Nota. La gráfica muestra los valores de descenso de temperatura a través del tiempo.

Representación en el espacio de los estados: Modelado geométrico de la cabina del vehículo Ford Escape

En este trabajo se utilizó el software ANSYS 2023 R1 para la simulación de CFD o el análisis numérico de la distribución del flujo de aire y la transferencia de calor en la cabina del automóvil SUV marca Ford Escape, la cual se muestra en la Figura 15.

Las bondades de la aplicación para desarrollar el modelo asistido computacionalmente por ANSYS 2023 R1 para el vehículo SUV marca Ford Escape. Como resultados determinísticos se procederá a visualizar la turbulencia del flujo del aire en la cabina al momento de ejecutar el encendido del A/C. Este análisis, se enfoca en el dimensionamiento real y de los parámetros tanto de las presiones, la temperatura de experimentación y rapidez en el flujo del aire por medio de la turbina.

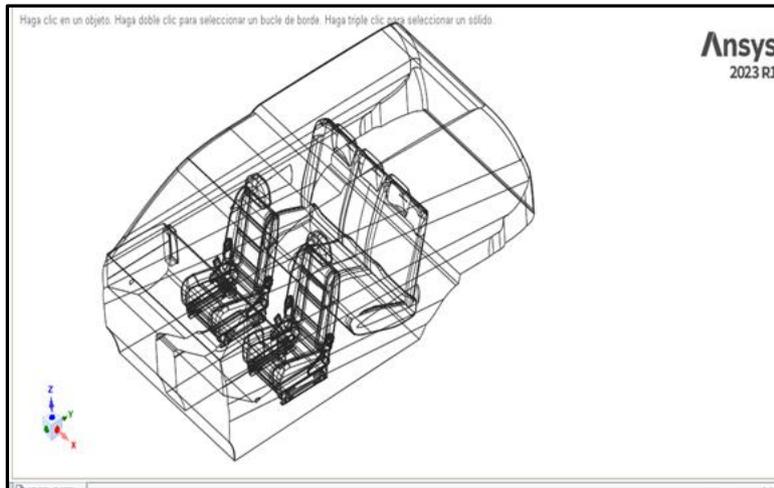
Figura 15.*Cabina del vehículo Ford Escape*

Nota. Se presenta un diagrama con la cabina del vehículo Ford Escape

Como aspecto clave al pre procesamiento de la simulación, se tomó en consideración el vehículo Ford Escape, el cual es un tipo de vehículo SUV que es representado por un diseño de cabina por medio del software Inventor. Y que posteriormente, se ha empleado el software Space clean ya que este se permite en poco tiempo la modificación y la optimización del entorno geométrico: también, permite parametrizar cualquier diseño dependiendo de las necesidades de la segunda fase en el estudio que concierne a la simulación.

La geometría de modelado: la cabina del automóvil Ford Escape en 3D se modeló utilizando el software de modelado de diseño (ANSYS 2023 R1). La vista isométrica de la cabina del automóvil de pasajeros se muestra en la Figura 16.

Figura 16.*Modelado geométrico de la Cabina del vehículo Ford Escape*

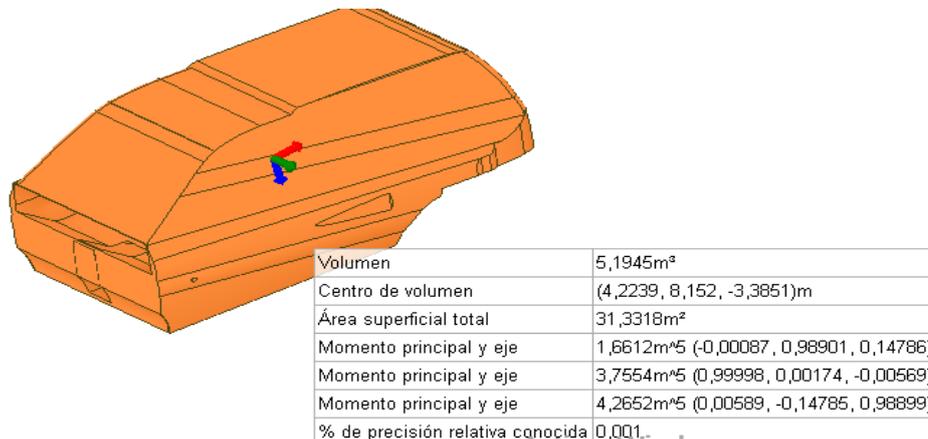


Nota. Se presenta un modelo de la cabina del Ford Escape

Volumen de la cabina: Una vez determinada la geometría de la cabina es necesario determinar el volumen interno del mismo, ya que es por donde se va a distribuir el aire acondicionado, cabe recalcar que el volumen interno es netamente de aire y tiene un valor de 5,1945 m³, este dato lo podemos apreciar en las propiedades que se muestran en la **Figura 17**.

Figura 17.

Volumen interno de la cabina



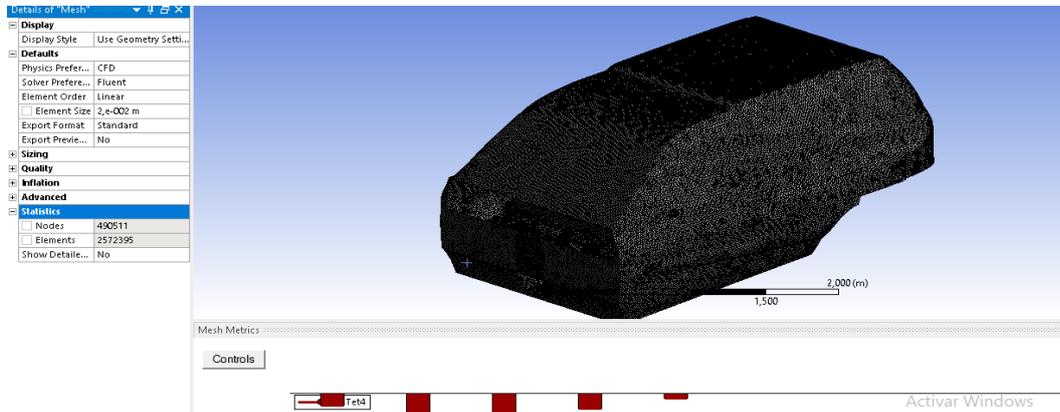
Nota. Se presenta un diagrama con el volumen de la cabina del vehículo Ford Escape

Estructura de malla: en cálculos numéricos, la estructura de malla del dominio computacional es muy importante para obtener resultados predichos con buena precisión y reducir el tiempo de cálculo. Una vez obtenido el análisis computacional de nuestra cabina

podemos observar que la superficie de la cabina tiene un mallado de 490511 nodos y 2572395 elementos (ver **Figura 18.**)

Figura 18.

Mallado computacional de la cabina

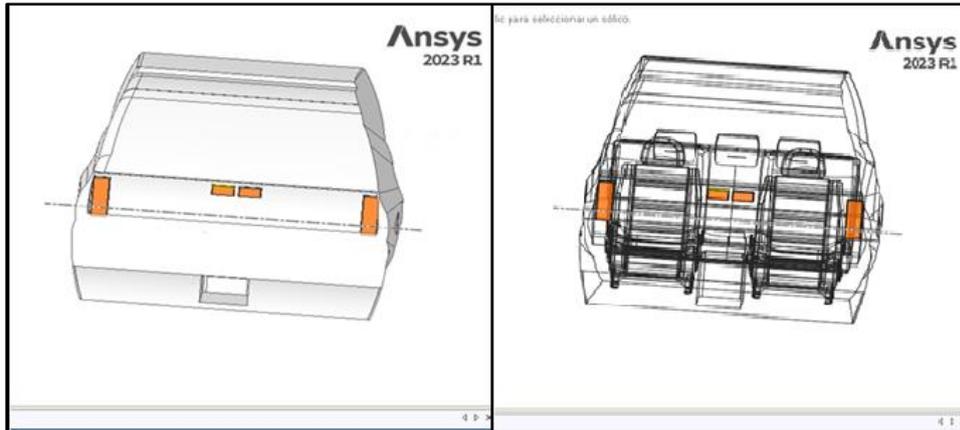


Nota. Se presenta el mallado de la cabina simulado computacionalmente

En cuanto al modelado del sistema HVAC de aire acondicionado, este consta de 4 rejillas que permiten la salida de aire acondicionado hacia el habitáculo del vehículo, estas rejillas de salida de aire se ubican en pares a los extremos y dos en el centro del tablero del vehículo (ver **Figura 19.**).

Figura 19.

Disposición de las rejillas para la salida de aire



Nota. Se muestra la disposición de las rejillas para la salida de aire en el sistema HVAC de Ford Escape

Tabla 2.

Valores de la superficie de cada una de las rejillas de salida de aire A/C

	Ubicación de rejilla	Largo	Ancho	Superficie
1	Rejilla extrema (Izq.)	0,2337 m	0,08375 m	0,01957m ²
2	Rejilla central (Izq.)	0,115 mm	0,0525 mm	0,0060375m ²
3	Rejilla central (Der.)	0,115 mm	0,0525 mm	0,0060375m ²
4	Rejilla extrema (Der.)	0,2337 m	0,08375 m	0,01957m ²

Nota. En la tabla se presentan cada uno de los valores correspondientes a las cuatro rejillas de salida de aire

Parámetros y puntos de operación del modelo matemático

El software CDF simula y resuelve numéricamente ecuaciones continuas, de energía y de transporte con efectos de convección natural previa definición de los parámetros del modelo matemático. En el análisis numérico, se utiliza un modelo k- ϵ realizable para modelar el flujo turbulento.

Este modelo de turbulencia se usa generalmente para tales cálculos debido a la estabilidad y precisión de los resultados numéricos. El modelo de turbulencia k- ϵ realizable se deriva de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes, utilizando una técnica matemática.

Este modelo es diferente del modelo k- ϵ estándar, términos y funciones adicionales en las ecuaciones de transporte para k y ϵ . En el dominio computacional, se generó una malla tetraédrica tridimensional que contenía elementos triangulares en las superficies de las partes de la cabina y elementos tetraédricos en la región del volumen central.

Para la simulación en complemento, se emplea el software Discovery live, ya que por medio de este se desarrolla un tipo de simulación dinámica debido al hecho de que permite la obtención de las mediciones observadas a cada segundo, describiendo en detalle cómo se desarrolla el proceso simulado de flujo de aire acondicionado según los parámetros que se especifican a continuación.

Parámetro del Aire: Es de interés definir los valores concernientes a los parámetros del aire, objeto de análisis en la cabina del vehículo Ford Escape. Por ende, se procede a seleccionar en el software (ver **Figura 20.**).

Figura 20.

Selección de los parámetros del aire



Nota. Proceso de selección

Una vez que se seleccionada la opción Air (Gas), los parámetros o las características del aire se cargan por defecto automáticamente y se establecen de la siguiente forma: Densidad

de 1.16 Kg/m^2 , viscosidad de $1.83\text{e}^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, coeficiente de expansión térmica de $0.00333 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, conductividad térmica variable y calor específico variable (ver **Figura 21**).

Figura 21.

Identificación de los parámetros del aire



Nota. Se muestra el proceso de identificación de parámetros del aire

Parámetros asociados con la temperatura inicial de la cabina: Para la temperatura interna de la cabina del vehículo SUV modelo Ford Escape, se utilizó 32°C en esta investigación debido a un valor de referencia considerada en previas investigaciones de Acosta y Tello (2016) al considerar la ubicación del vehículo en la ruta Urbana-Quito y sin aire acondicionado en la cabina.

Tabla 3.

Valores de la cabina sin aire acondicionado

Rutas	Temperaturas ($^\circ\text{C}$)	Humedad Relativa (%)
Urbana-Quito	31.88	62.17
Otavallo-Ibarra	30.23	63.33
Ambuquí-El Juncal	27.68	72.50
Tonsupa-Súa	33.34	70

Nota. Tomado de (Acosta y Tello, 2016)

Tabla 4.

Valores de la cabina con aire acondicionado

Rutas	Temperaturas (°C)	Humedad Relativa (%)
Urbana-Quito	18.87	47.50
Otavallo-Ibarra	20.35	47.17
Ambuquí-El Juncal	19.88	61.50
Tonsupa-Súa	19.13	66.67

Nota. Tomado de (Acosta y Tello, 2016)

Figura 22.

Identificación de los parámetros de temperatura inicial del fluido



Nota. Se muestra el proceso de selección de la temperatura inicial

Parámetro de convección: Otro de los parámetros a modificar corresponde al coeficiente de convección, el cual es de interés para usar en la presente simulación. Lo anterior, es debido a que tal parámetro toma en consideración el modo de transferencia de calor por convección en función a la convección forzada (Ver Tabla 5).

Tabla 5.

Coefficiente de transferencia de calor

Medio	Coefficiente de transferencia de calor $h(W/m^2, k)$
Aire (Convección natural)	5-25
Aire/Vapor Supercalentado (Convección forzada)	20-300
Petróleo (Convección forzada)	60-1800
Agua (Convección forzada)	300-6000

Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

Nota. La tabla muestra los rangos de los cocientes de transferencias de calor.

Con referencia a lo expuesto en la tabla, se va a especificar un valor de $25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ debido a que el tipo de convección que vamos a realizar es una convección forzada.

Figura 23.

Especificación del tipo de convección



Nota. Se muestra el proceso de determinación del tipo de convección utilizado

Condiciones de contorno

El análisis CFD en el modelo virtual del automóvil Ford Escape y sus compartimientos se realizaron con el fin de investigar las condiciones de las distribuciones de temperatura y rapidez del aire en el compartimiento bajo un conjunto dado de condiciones.

Para hacer esto, se prescribieron ciertas condiciones límite en el modelo del compartimiento de pasajeros que involucran cuatro parámetros, a saber, presión del aire, temperatura del aire, el incremento del calor a través de las paredes del compartimiento y la rapidez del aire en las ventilas de entrada del A/C (Rameshkumar et al., 2013).

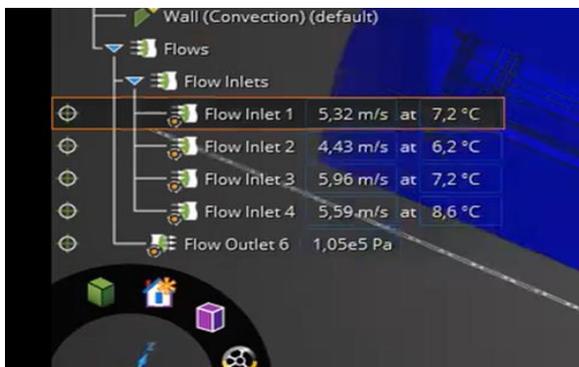
La velocidad del aire de las ventilaciones de entrada se especificó en la figura 24-5; oscilando entre 4.43 m/s a 5.96 m/s y la temperatura entre 6.2 °C hasta 8.6 °C (Ver **Tabla 5**). Se consideró la condición de contorno convectiva en las superficies de vidrio y las superficies

exteriores de la cabina. El coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior de la cabina se fijó en $31.9 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

En cuanto a los parámetros de velocidad y temperatura que se utilizada en cada una de las rejillas de la cabina del vehículo, se tomó como referencia a los valores obtenidos en el estudio de (Cajo, 2022). Estos se especificaron en el software de simulación, como se refiere en la siguiente figura:

Figura 24.

Especificación de velocidad y temperatura en el Software CDF



Nota. La figura muestra el proceso de especificación de los parámetros de velocidad y temperatura en el Software CDF

Figura 25.

Ajustes de velocidad y temperatura en el Software CDF



Nota. Se muestra el proceso de ajustes de los parámetros de velocidad y temperatura en el Software CDF

Los valores de la velocidad corresponden a cada una de las cuatro rejillas del vehículo en donde:

Tabla 6.

Definición de parámetros de velocidad y temperatura

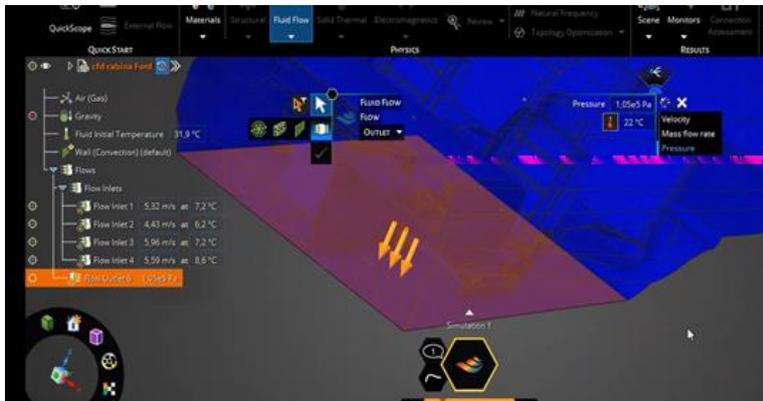
Ubicación de los difusores	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)
Rejilla extrema izquierda	5.32	7.2
Rejilla central izquierda	4.43	6.2
Rejilla central derecha	5.96	7.2
Rejilla extrema derecha	5.59	8.6

Nota. Tomado de (Cajo, 2022)

Al considerarse como son las salidas del aire, estas se realizan en la parte inferior de la cabina (Ver **Figura 26**).

Figura 26.

Salida de aire en la cabina de vehículo en el Software CDF

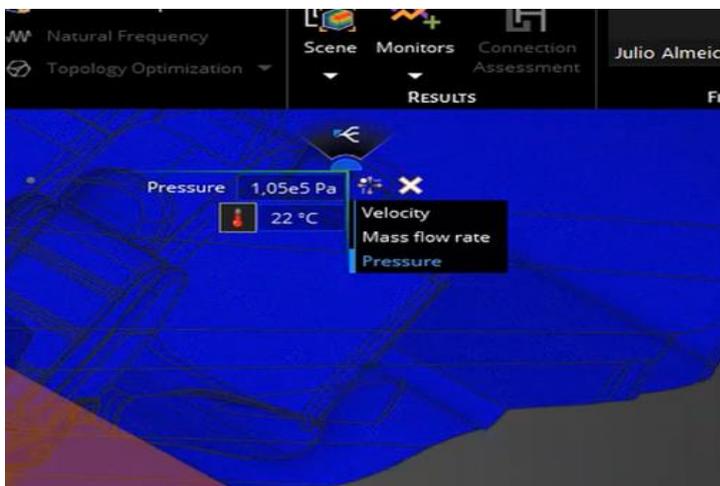


Nota. Se muestra una representación de la salida de aire en la cabina de vehículo en el Software CDF

Y en cuanto a la presión, esta se procede a especificar en el software de simulación tal como se evidencia en la figura siguiente:

Figura 27.

Parámetros presión en el Software CDF



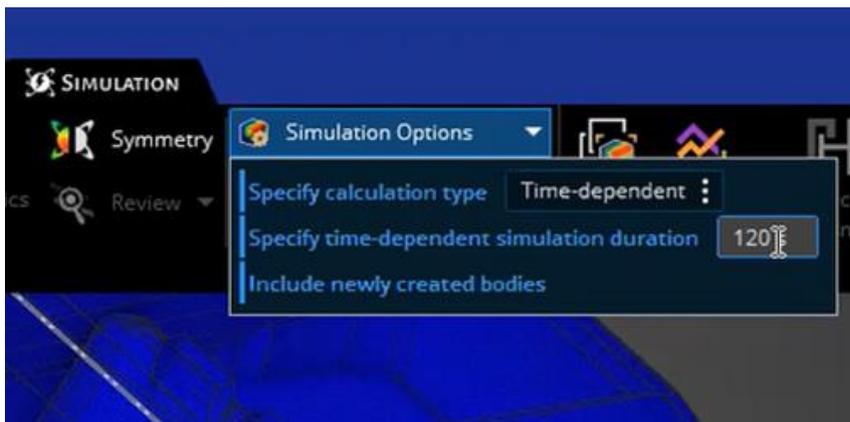
Nota. Se muestran los ajustes de los parámetros presión en el Software CDF

Simulación en ANSYS

Las opciones de simulación, han sido determinantes al ejecutar una simulación dinámica que va a depender del tiempo, para lo cual se ha puesto interés en evaluar un tiempo de 120 segundos, tal como se puede evidenciar en la **Figura 28**.

Figura 28.

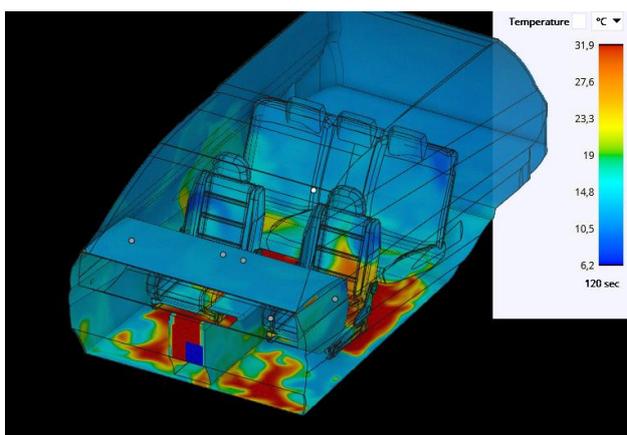
Parámetro de tiempo para ejecutar a simulación



Nota. Se muestra la especificación del parámetro de tiempo para ejecutar a simulación

Figura 29.

Distribución de la temperatura en habitáculo del vehículo



Nota. Se muestra la distribución de la temperatura en habitáculo del vehículo a los 120 segundos

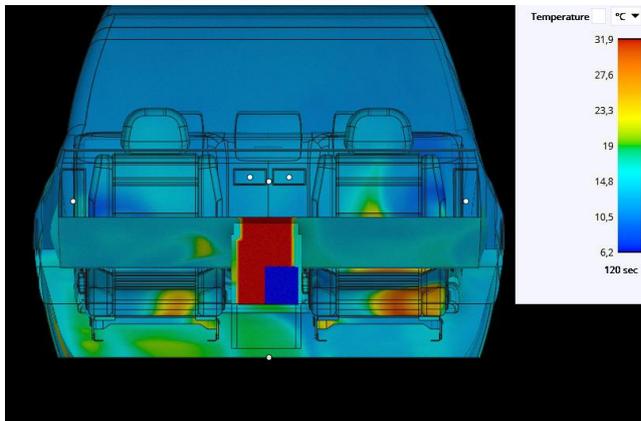
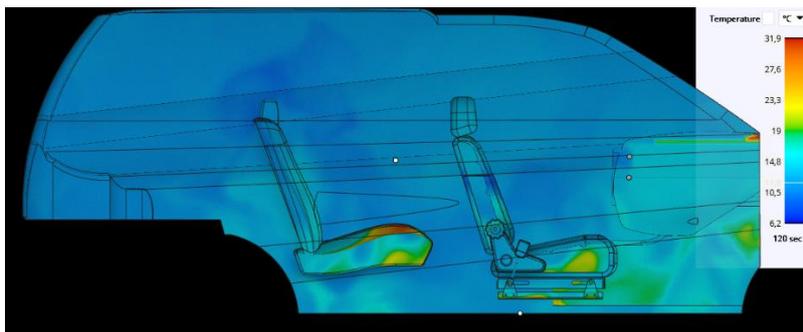
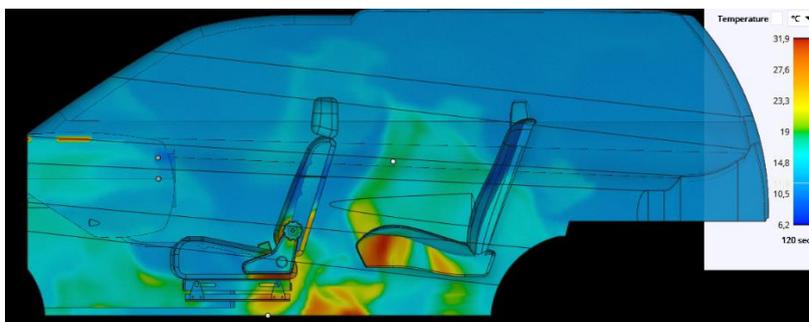
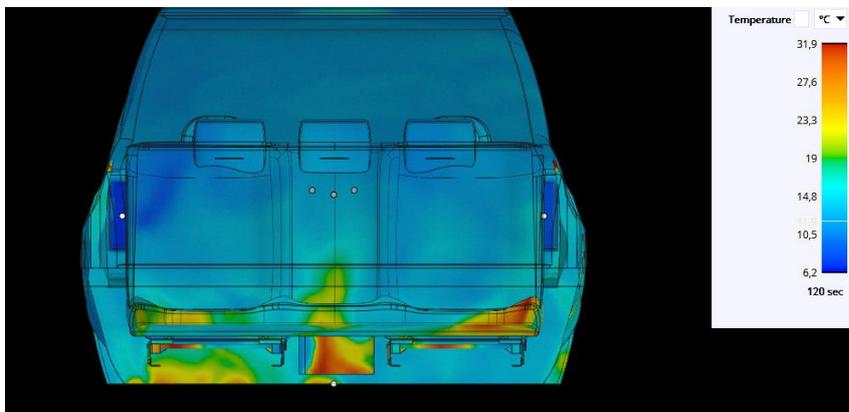
Figura 30.*Distribución frontal de la temperatura**Nota. Se muestra la distribución frontal de la temperatura en habitáculo del vehículo***Figura 31.***Temperatura en habitáculo lateral izquierdo**Nota. Se muestra la temperatura en habitáculo lateral izquierdo del vehículo***Figura 32.***Temperatura en habitáculo lateral derecho**Nota. Se muestra la temperatura en habitáculo lateral derecho del vehículo*

Figura 33.

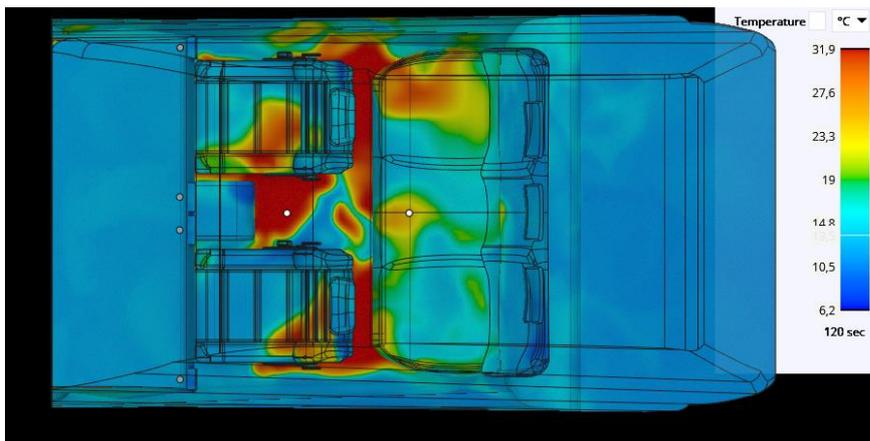
Distribución trasera de la temperatura en habitáculo del vehículo



Nota. Se muestra la distribución trasera de la temperatura en habitáculo del vehículo

Figura 34.

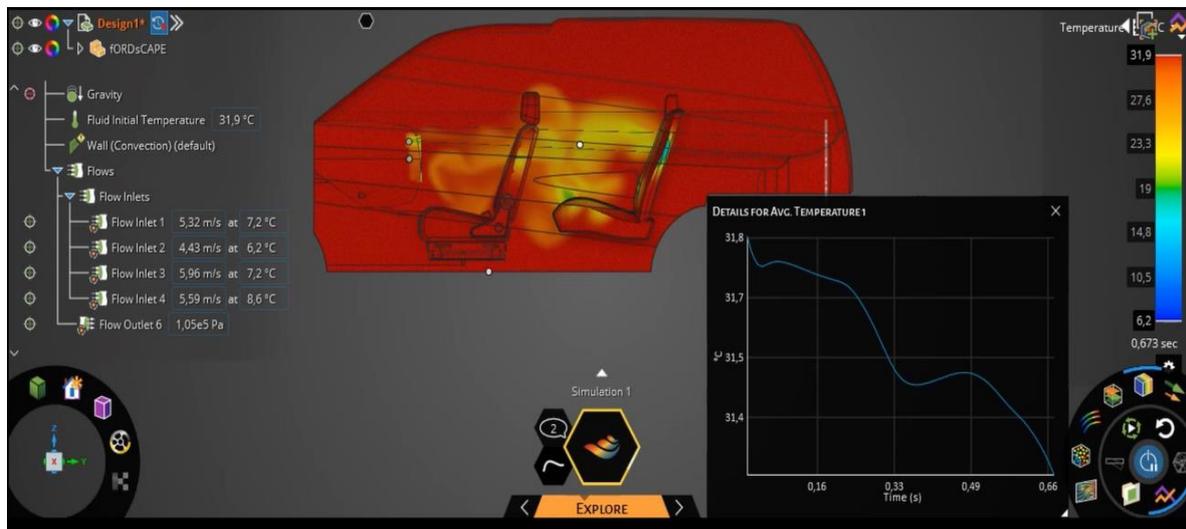
Distribución trasera de la temperatura plano superior del vehículo



Nota. Se muestra la distribución de la temperatura desde plano superior del habitáculo en el vehículo

Figura 35.

Flujo del caudal de aire en el eje x.



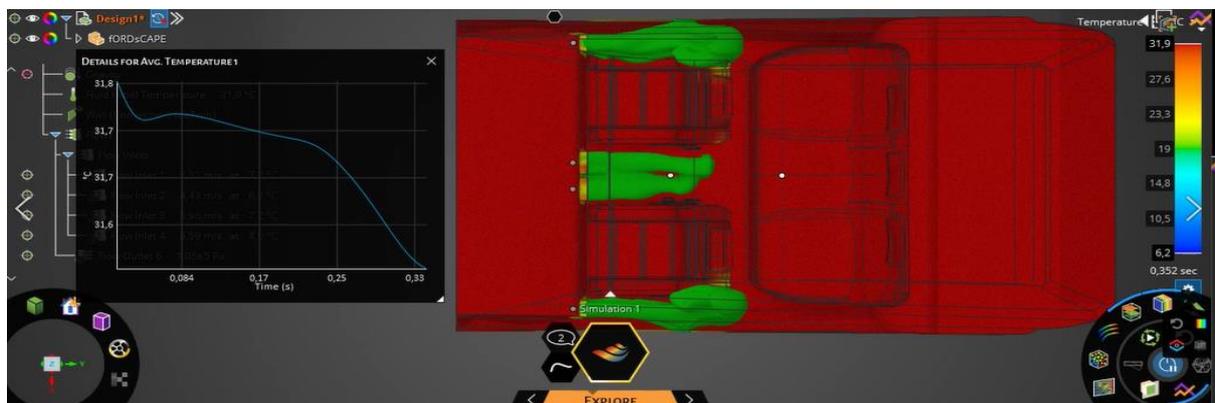
Nota. Se muestra el flujo del caudal de aire en el eje x.

Como se aprecia, se evidencia el flujo del aire frío con respecto a las ubicaciones en las salidas de las cuatro rejillas frontales para un tiempo de 0 segundos hasta 0.28 segundos.

Siendo las dos rejillas de la consola central las que producen un notable cambio en la percepción del color de rojo (calor) a un color amarillento a verde (frío); esto implica la obtención de una presión en los $1.05e^5$ (Pa), en el flujo del aire que afecta las presiones internas sobre las estructuras inherentes (asientos de pasajeros) observándose los cambios en el color de perfil amarillo a naranja. Lo anterior se interpreta en que el flujo uniforme del aire ejerce presión en la estructura de las butacas hasta vencer esa masa y transferir el flujo a la parte trasera de la cabina o lo que representa la parte posterior en la cajuela del vehículo.

Figura 36.

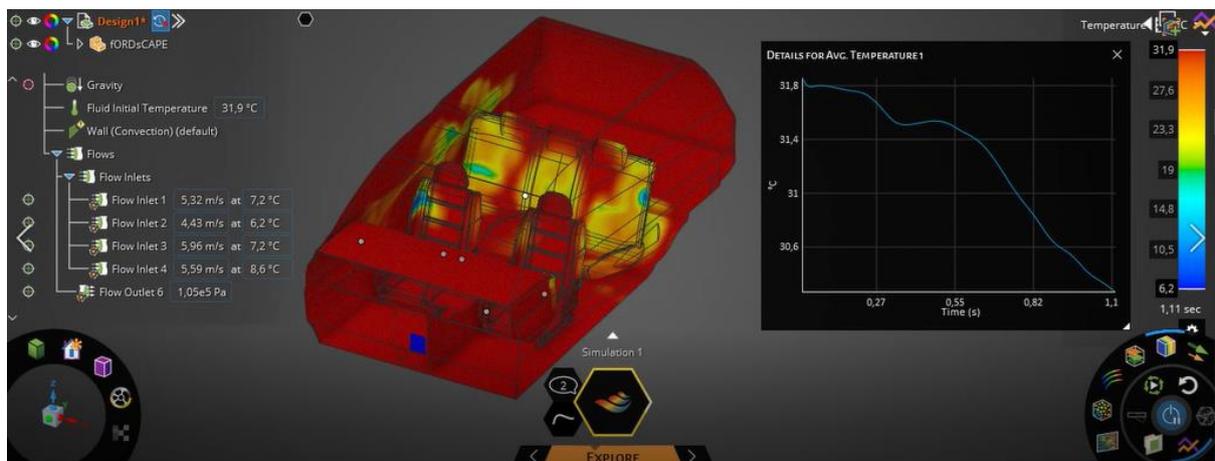
Flujo del caudal de aire en el eje y.



Nota. Se muestra el flujo del caudal de aire en el eje y.

Figura 37.

Flujo del caudal de aire en el eje z.

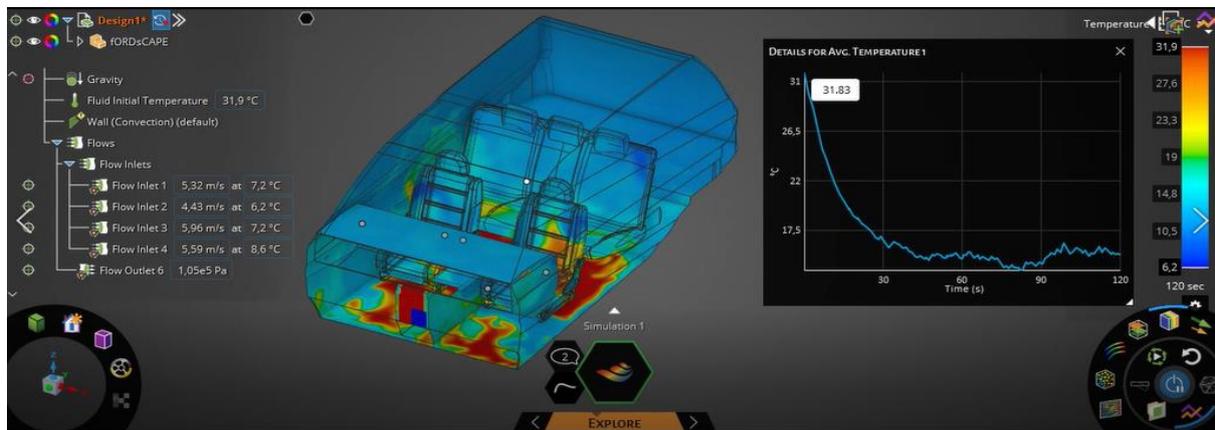


Nota. Se muestra el flujo del caudal de aire en el eje z.

Con los resultados del flujo del aire en el eje z, se enfatiza como ocurre el flujo del aire frío en el habitáculo. Mostrándose como ocurre la proyección del aire renovado en todo el habitáculo en relación con valores de los parámetros de prueba para la simulación.

Figura 38.

Temperatura final en el habitáculo del vehículo, eje z.

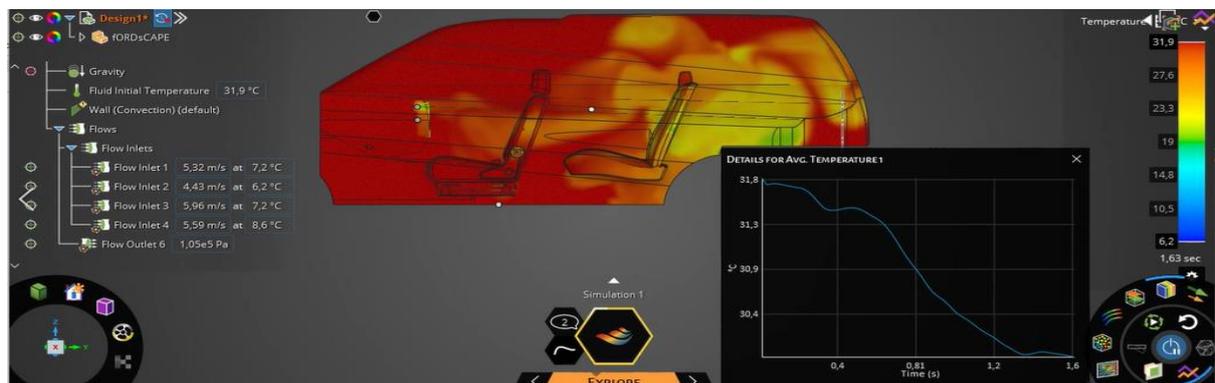


Nota. Se muestra la temperatura final al cabo de los 120 segundos en el habitáculo del vehículo, eje z.

La relación entre la temperatura con el flujo del aire, se evidencia que se produce cambio de temperatura de 31.83°C hasta los 11.65°C obtenidos a los 120 segundos de la simulación, en este punto la desviación de la temperatura es perceptible por la turbulencia que se ha generado por el constante flujo del aire en la cabina con relación a la temperatura (ver **Figura 39**).

Figura 39.

Flujo del caudal de aire en el eje x



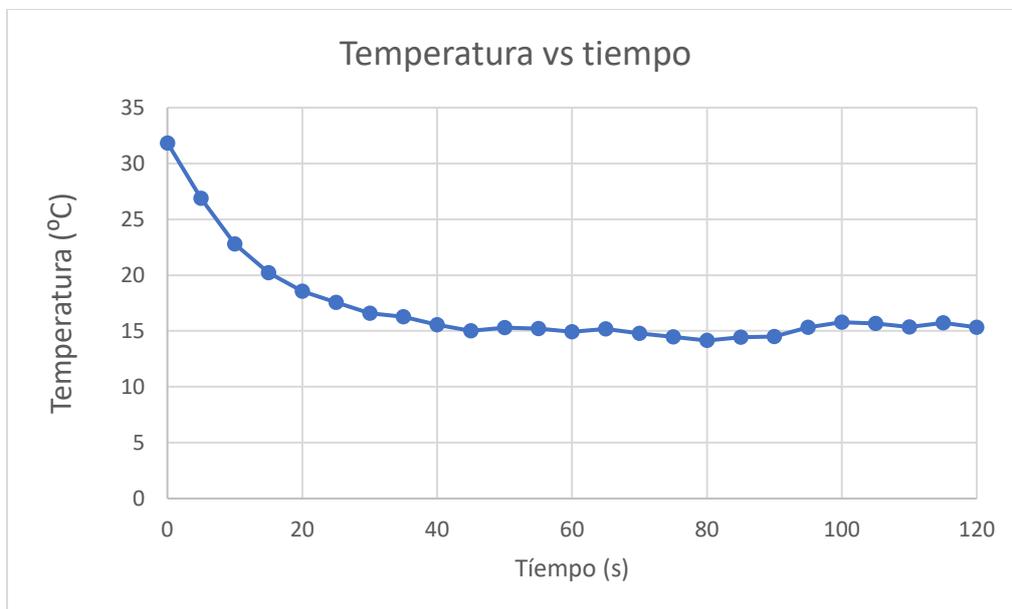
Nota. Se muestra el flujo del caudal de aire en el eje x a los 1.63 segundos.

Se observan las salidas en el flujo del aire frío al habitáculo generando una turbulencia de 1.6 m/s en promedio por las cuatro rejillas de salidas del aire que alcanza el tope final en la estructura de la cajuela del vehículo SUV modelo Ford Escape; esto según lo que estipula (ASHRAE, 1988), es permitido ya que el aire viaje menos de 1.4 m/s, con ese flujo del aire frío se mantiene el confort térmico sin producir estrés por el frío en los pasajeros.

Los resultados de la temperatura media de la cabina se muestran en la **Figura 40**.

Figura 40.

Temperatura vs el tiempo



Nota. Se muestran los valores de temperatura con respecto al tiempo

La **Figura 40** es una gráfica del descenso de la temperatura a través del tiempo que transcurre en la simulación, en la gráfica podemos apreciar que la temperatura interna inicial de la cabina del vehículo es de un valor de 31,8 °C cuando el tiempo de simulación es de 0 segundos, a medida que transcurre el tiempo y el aire empieza a ingresar al interior de nuestra cabina podemos observar como la temperatura interna desciende hasta llegar a una temperatura de 15 °C en un tiempo de 60 segundos, podemos apreciar que después de los 60 segundos la temperatura empieza a mantenerse constante en un rango de 14,5 °C y 15,5 °C.

Analisis comparativo de los resultados de la simulacion y el modelo matematico

Como se puede observar, **Figura 40** de temperatura obtenida por la simulación es muy similar a la **Figura 41** de nuestro modelo matemático, con diferencias inferiores a 0.5 °C, resultado que valida la simulación. Sin embargo, el tiempo de enfriamiento mostrado por ambos modelos es extremadamente rápido ya que en sólo 40 segundos el aire del habitáculo del vehículo alcanza una temperatura de estable alrededor de los 15°C. Este hecho está motivado por considerar únicamente la masa térmica del aire contenido en el interior del vehículo. Para mejorar el modelo es necesario incrementar la masa térmica del interior del habitáculo. Para ello se puede asumir una determina masa M expresada en kg con un calor específico de C_p de 2 kJ/(kg °C). Con una masa interna de 100kg el valor del coeficiente k_1 sería:

$$k_1 = v * d * CP + M * C_{pM} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$k_1 = 5,1945 \text{ m}^3 * 1,16 \text{ kg/m}^3 * \frac{1,007 \text{ kJ}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C} + 100 \text{ kg} * 2 \text{ kJ/kg}$$

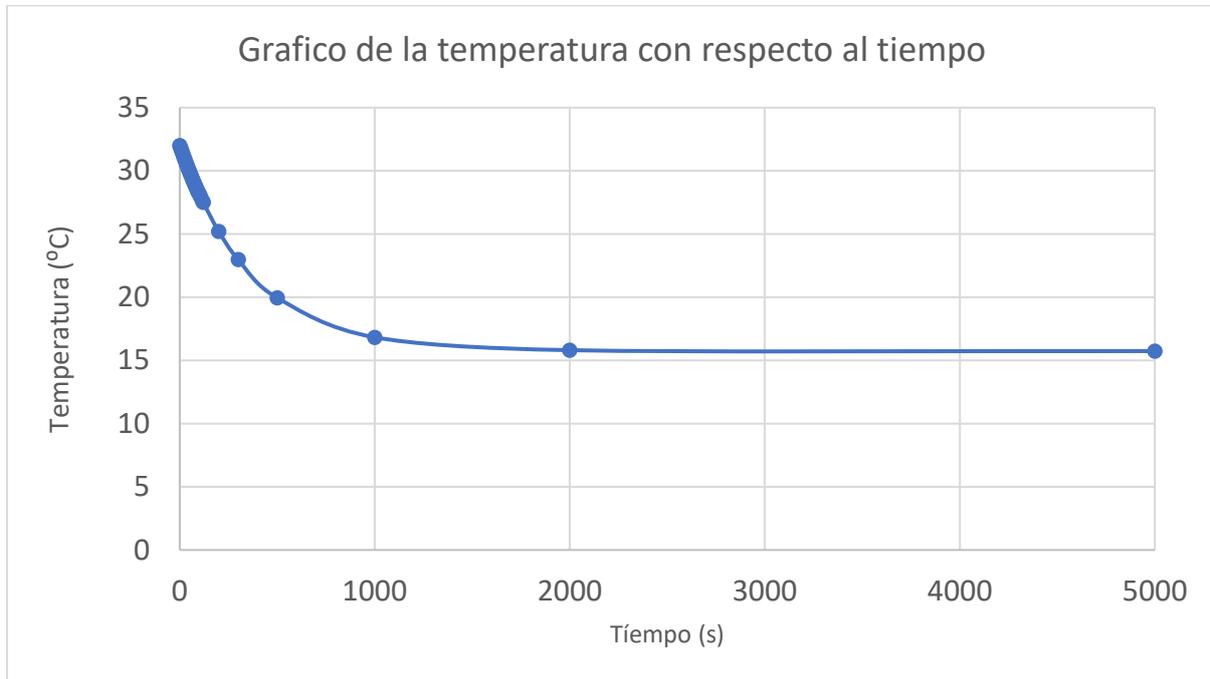
Ecuación 31

$$k_1 = 206 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 32}$$

Con ese valor del coeficiente de inercia el tiempo de enfriamiento de la cabina es mucho más elevado, llegando a una temperatura alrededor de los 15 °C en 2000 s (33 minutos), tal como se puede ver en la **Figura 42**, tiempo muy razonable si lo comparamos con la realidad y considerando que a lo sumo debemos alcanzar una temperatura de confort de 20 °C.

Figura 42.

Temperatura vs el tiempo con mayor inercia



Nota. Se muestra la gráfica de temperatura vs el tiempo con mayor inercia

El efecto de la inercia térmica también se puede ver en el tiempo necesario para que el habitáculo del vehículo alcance una temperatura de 20 °C. Con una masa interna de 0, a parte del aire, el tiempo resultante es de 14 s (0.24 min). Sin embargo con 100 kg el tiempo de enfriamiento es de 8 minutos y con 200 kg algo más de 16 minutos, valores más realistas.

A partir de los datos de entrada y resultados del modelo matemático se puede establecer la temperatura de salida del evaporador, es decir la temperatura de entrada del aire hacia el habitáculo, mediante el balance de energía en el mismo por medio de la ecuación:

$$T_{sev} = T_m - \frac{Q}{m \cdot CP} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

T_m : Es la temperatura del aire mezcla del aire de recirculación con el aire exterior (°C)

Q : Es la potencia del aire acondicionado (kW)

m : Es el caudal másico de aire en (kg/s)

CP: Es el calor específico del aire en kJ/kg

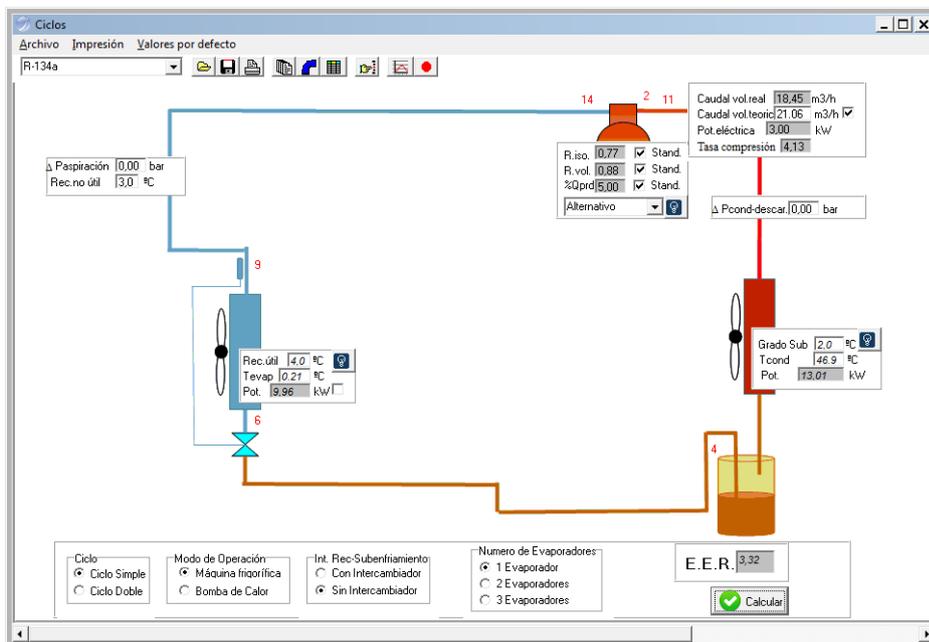
T_m se estima a partir de la temperatura exterior, la temperatura de la cabina en ese instante y el coeficiente de bypass con la siguiente ecuación:

$$T_m = \gamma T_e + (1 - \gamma)T \quad \text{Ecuación 13}$$

La temperatura media de funcionamiento del evaporador T_{ev} se estima en 7°C por debajo de T_{sev} . Finalmente se asume una temperatura del condensador 15°C superior a la temperatura ambiente. Con esos resultados de temperaturas, mediante la aplicación FRIO y asumiendo que el compresor de este vehículo tiene una capacidad máxima de desplazamiento volumétrico de 175.5 cm^3 , un régimen del motor de 2000 rpm y el gas refrigerante R134a, se determinan la capacidad frigorífica, la potencia mecánica necesaria y la Eficiencia Energética de Refrigeración (EER).

Figura 43.

Ciclos frigoríficos de la aplicación FRIO



Nota. Se muestra la pantalla de cálculo de ciclos frigoríficos de la aplicación FRIO.

Todos estos resultados se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7.

Tiempo de enfriamiento y parámetros operativos del sistema de climatización automotriz

Masa interna	Tfinal	Tiempo	Tsal evap	Tev	Tcond	Potencia Máxima refrigeración	Potencia mecánica comp.	EER
Kg	°C	min	°C	°C	°C	kW	kW	-
0	20	0.24	4.0	0.21	46.9	9.96	3.00	3.32
100	20	8.26	10.9	3.9	46.9	11.68	3.24	3.60
200	20	16.27	11.4	4.5	46.9	11.98	3.28	3.66

Nota. Elaboración propia

Conclusiones

- Para concluir podemos afirmar que la fundamentación teórica de los componentes del sistema de aire acondicionado nos permitió establecer los valores y parámetros que influyen en el funcionamiento de aire acondicionado en la cabina del vehículo.

- Una vez determinado los valores y parámetros de un sistema de aire acondicionado se desarrolló el modelo geométrico de la cabina que posteriormente fue utilizada en nuestra simulación en ANSYS, la cual demostró el flujo de aire acondicionado en la cabina y el tiempo en el que se demora en descender la temperatura con respecto al tiempo.

- Además, se ha desarrollado un modelo matemático en régimen transitorio del comportamiento térmico del habitáculo del vehículo Ford Escape que permitió validar los resultados obtenidos en la simulación CFD realizada en ANSYS, obteniendo valores con una buena concordancia con diferencias inferiores a 0.5 °C.

- El modelo desarrollado presenta el inconveniente del rápido tiempo de enfriamiento por no considerar la inercia térmica de las masas del interior del habitáculo, lo que ha hecho necesario mejorar el modelo considerando esta inercia térmica. Con ellos se obtienen tiempos de enfriamiento muchos más razonables y realistas, enfriando el aire del vehículo a 20 °C con 100 kg de masa térmica y en algo más de 16 minutos con 200 kg.

- Por último, a partir de los resultados del modelo matemático y con los datos técnicos del compresor, se han determinado las condiciones operativas del sistema de climatización automotriz, dando resultados totalmente coherentes con la realidad.

Recomendaciones

- Antes de realizar todo proceso de simulación se debe disponer a detalle el mallado del modelo geométrico de la cabina del vehículo objeto de estudio.
- Las medidas de temperatura internas, presión y viscosidad en el habitáculo del vehículo deben ser comparadas con mediciones experimentales con los instrumentos adecuados; para luego, realizar un análisis comparativo de los registros empíricos y los simulados con el objeto de validar el modelo CFD obtenido.

Futuros trabajos

Para futuras líneas de investigación se propone profundizar en la importancia del sistema de A/C en términos de necesidades energéticas y las restricciones en términos de refrigerantes, cotejando el estudio del performance en función a las nuevas tecnologías emergentes que mejoran la eficiencia. Es decir evaluar el desempeño con el tipo de refrigerante R134a y con el R1234yf, para posteriormente plasmar comparaciones.

Adema de profundizar en el diseño de un sistema que permita la reducción del consumo de combustible en los vehículos utilitarios, sin comprometer la eficiencia del sistema de aire acondicionado.

Referencias Bibliográficas

- Acosta y Tello. (2016). Estudio del aire acondicionado en el Consumo de combustible, Potencia del Motor y Confort Térmico en la Cabina de un Vehículo Liviano. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15960>
- AEADE. (2020). *Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador*. <https://www.aeade.net/>
- Agarwal, N., y Ekhlak, K. (06 de June de 2018). Automobile Air Conditioning System. (e.-I. 2395-0056, Ed.) *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 05, 2121-2125. <https://www.irjet.net/archives/V5/i6/IRJET-V5I6398.pdf>
- Aguirre, N. (30 de Junio de 2021). *Evaluación en ruta del consumo de combustible y emisiones contaminantes de un vehículo utilizando aire acondicionado en la ciudad de Quito*. UISEK. Repositorio UISEK.: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4250/1/Aguirre%20Bayas%2C%20Nicolas%20Damian.pdf>
- Ashrae. (1988). *Handbook of Fundamental, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning*, . Atlanta: GA.
- ASHRAE. (2001). Standard 34-2001 Safety Classification of Refrigerants. . *American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*,.
- Belman, J. (2008). *Desarrollo de un modelo físico para una instalación de producción de frío por compresión de vapor utilizando el refrigerante R134a Validación experimental y aplicación para la simulación energética*. Universitat Jaume.
- Belman, J., Barroso, J., Mendoza, J., y Gallegos, A. (2013). Simulación energética de un aire acondicionado automotriz trabajando con refrigerantes R-1234yf y R134a. *Universidad de Guanajuato*, 1-10. https://www.researchgate.net/publication/269168278_Simulacion_Energetica_de_un_

Aire_Acondicionado_Automotriz_Trabajando_con_Refrigerantes_R-1234yf_y_R-134a

- Bingo. (22 de 3 de 2024). *Sistema de aire acondicionado / refrigeración del corre del interruptor de presión a/c*. es.sgmls.com: <https://es.sgmls.com/c-pressure-switch-car-ac-cooling-system.html>
- Bonilla, J. (2015). *Propuesta de selección e instalación de un sistema de aire acondicionado para los quirófanos del Hospital Policlínico Roma del Instituto Salvadoreño del Seguro Social*. Universidad de El Salvador.
- Cajo, D. (2022). *Análisis CFD de la Distribución de Flujos de Aire Acondicionado en el Interior de un Vehículo [TFG]*. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. ESPOCH.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/17106/1/65T00457.pdf>
- Capital Refrigeracao. (22 de 3 de 2024). *Evaporador estático horizontal 1300 mm com 6 tubos de 1/2 pol*. Capitalrefrig.br: <http://www.capitalrefrig.com.br/evaporador-estatico-horizontal-1300-mm-com-6-tubos-de-12-pol>
- Carvajal, V., Cando, W., y Valenzuela, M. (2010). *Construcción de un sistema de aire acondicionado automotriz agregándole un habitáculo*. ESPOL.
- Chen et al. . (2000). Design. . *International Journal, for Indoor and Outdoor Environment* , 1(1), 140-29.
- Chiang, B., Mat, I., Jamaluddin, H., y Kamar, H. (2014). Application of adaptive neural predictive control for an automotive air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering*, 73, 1244-1254.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.044>
- Conesa, J. (2011). *Sistema de refrigeración por compresión*. Universidad de Alicante.
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>

- Da Silva, D., y Melo, C. (2016). *Perspective on R&D&I activities in the Brazilian mobile air-conditioning market*. 16 Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.
- Deyac. (22 de 3 de 2024). *Condensadores de autos y de aire acondicionado para todas las marcas*. Deyac.com.mx: <https://deyac.com.mx/collections/condensadores-automotrices>
- Endado. (22 de 3 de 2024). *¿Funciona bien el aire acondicionado del coche?* Endado.com: <https://www.endado.com/blog/funciona-bien-el-aire-acondicionado-del-coche/>
- Grundstein, A., Meentmeyer, V., y Dowd, J. (2009). Maximum vehicle cabin temperatures under different meteorological conditions. *Int. J. Biometeorol*, 53, 255-261.
- Hidrovo, D., Meza, E., y Romero, F. (2016). Impacto ambiental del parque automotor del cantón Quevedo. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*.
<https://www.eumed.net/rev/caribe/2016/10/automotor.html>
- Infotaller. (22 de 3 de 2024). *Cómo funciona y cuándo debe sustituirse el filtro deshidratante del climatizador*. Infotaller.tv: https://www.infotaller.tv/electromecanica/como-funciona-sustituirse-filtro-hidratante-climatizador-Valeo_0_1580541947.html
- Intersam. (22 de 3 de 2024). *Qué es una válvula de expansión termostática (VET) y cuáles son sus funciones*. Intersam.es: <https://intersam.es/que-es-una-valvula-de-expansion-termostatica-vet-y-cuales-son-sus-funciones/>
- ISO Standard. (2004). Ergonomics of the Thermal Environment- Determination of Metabolic Heat Production. *ISO Standard 8996, Rev.*
- Jabardo, J., González, W., y Ianella, M. (2002). Modeling and experimental evaluation of an automotive air-conditioning system with a variable capacity compressor. *International Journal of Refrigeration*, 25, 1157–1172.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00002-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00002-6)

- Kamar et al. (2012). Computerized Simulation of Automotive Air-Conditioning System: Development of Mathematical Model and Its Validation. *IJCS Issues*, 9(2), 23-34.
- Kargilis, A. (2003). Design and development of automotive air-conditioning systems. *ALKAR Engineering Company*.
- Kreuzer, F., y Wilmsmeier, G. (2014). *Eficiencia energética y movilidad en América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas.
- Lee, P., y Yoo, J. (2000). Performance analysis and simulation of automobile air-conditioning system. *International Journal of Refrigeration*, 23, 243-254.
- Leiton, J. (2022). *Diseño y construcción de un módulo didáctico del sistema de aire acondicionado como recurso de aprendizaje para los estudiantes de Mecánica Automotriz*. Tecnológico Universitario Vida Nueva.
- Martín, I., Dalcedo, R., y Font, R. (2011). *Mecánica de fluidos*. Universidad de Alicante.
- Matarrazo, G. (2014). REFRIGERACIÓN LOCAL DE VEHÍCULOS CON CALOR EXCEDENTE.
- McEnaney, R., Boewe, D., Yin, J., Park, Y., Bullard, C., y Hrnjak, P. (1998). Experimental comparison of mobile A/C systems when operated with transcritical CO₂ versus conventional R134a. *Univercity of Illinois*, 147-149.
<https://docs.lib.purdue.edu/iracc/402>
- Mogollón, P. (2016). *Modelación y control avanzado de un sistema de aire acondicionado para ahorro de consumo energético [TFD]*. Universidad de Piura.
- Pedersen, C., Fisher, D., y Liesen, R. (1997). Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads. *ASHRAE Transactions*, 103(2), 459-468.
- Plazas. (2012). Los refrigerantes y el medio ambiente. *Universidad Politécnica de Catalunya*, 39. <http://hdl.handle.net/2099.1/16336>

- Rameshkumar, A., Jayabal, S., y Thirumal, P. (2013). Cfd Analysis Of Air Flow And Temperature Distribution In An Air Conditioned Car. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*., 2(1), 06-06. <http://www.irjes.com/Papers/vol2-issue4/Version%20%202/A240106.pdf>
- Reda, I., Khalil, E., Aboudeif, T., y Degwy, E. (2017). Air Flow Regimes and Thermal Comfort in Vehicle Cabin Considering Solar Radiation. *Fluid Mechanics*, 4(4). <https://doi.org/10.4172/2476-2296.1000174>.
- Renedo. (2 de Marzo de 2010). *Refrigerantes y Salmueras*. <https://docplayer.es/50532524-T6-refrigerantes-y-salmueras.html>
- Rodríguez, P. (2020). *Fluidos refrigerantes: análisis de la normativa internacional*. Universidad de Sevilla.
- Rojas, J., y Segovia, J. (2011). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para sistemas automotrices*. ESPOCH.
- Rojas, V., Romero, V., Pancha, J., y Néjer, J. (2020). Control de la temperatura en el interior del habitáculo de un vehículo. *Lámpsakos*(23), 71-91. <https://www.redalyc.org/journal/6139/613964510007/html/>
- SAE. (1999). SAE Standard J639, Safety and Containment of Refrigerant for Mechanical Vapor Compression Systems used for Mobile Air Conditioning Systems.. *Society of Automotive Engineers (SAE)*.
- Sanz, F., y Sanz, D. (2014). *Control de refrigeración*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- SEMARNAT. (2019). *Hoja de ruta para implementar la Enmienda de Kigali en México*. Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales.

- Serrano, R., y Corredor, L. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de trigeneración de energía híbrida con optimización de sistemas de refrigeración para una empresa procesadora de mariscos*. Universidad del Norte.
- Tencio, G. (2016). *Diseño del sistema de gestión de mantenimiento para equipo de refrigeración y aire acondicionado en Grupo Poulton*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- UPIC. (22 de 3 de 2024). *Ventilador condensador*. Upicsa:
http://www.upicsa.com/suministros/auto/ventilador-condensador-a-a-ara-a_2937-81_45
- Villagran, E., y Bojacá, C. (2018). *Simulación con base en la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para el diseño y optimización de la ventilación natural de los invernaderos de flores de corte en la Sabana de Bogotá*. Produmedios.
- Villamil, H., y Piamba, O. (2005). Estudio y aplicación de ciclos de refrigeración - Refrigerantes alternativos. *Ingeniería de Recursos Naturales y dekl Ambiente*(3), 28-33. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117496005.pdf>
- Vinofer, B., y Rajakumar, S. (2016). Cooling Load Calculation and Design of Air Conditioning System in Automobile. . *International Journal of Research in Social Sciences And Humanities.*, 6(6). <http://www.ijrssh.com>
- Widman, R., y Linares, O. (22 de 3 de 2008). *Compresores su funcionamiento y mantenimiento*. Widman International SRL:
<https://es.slideshare.net/angelfercho/tipos-de-compresores>
- Zhai et al. . (2003). Application of CFD to Predict and Control Chemical and Biological Agent Dispersion in Buildings. *International Journal of Ventilation*, 2(3), pp. 251-264. 2003. <https://doi.org/10.1080/14733315.2003.11683669>

Zhang, H., Dai, L., Xu, G., Li, Y., Chen, W., y Tao, W. (2009). Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part I: Test/numerical model and validation. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2022–2027.

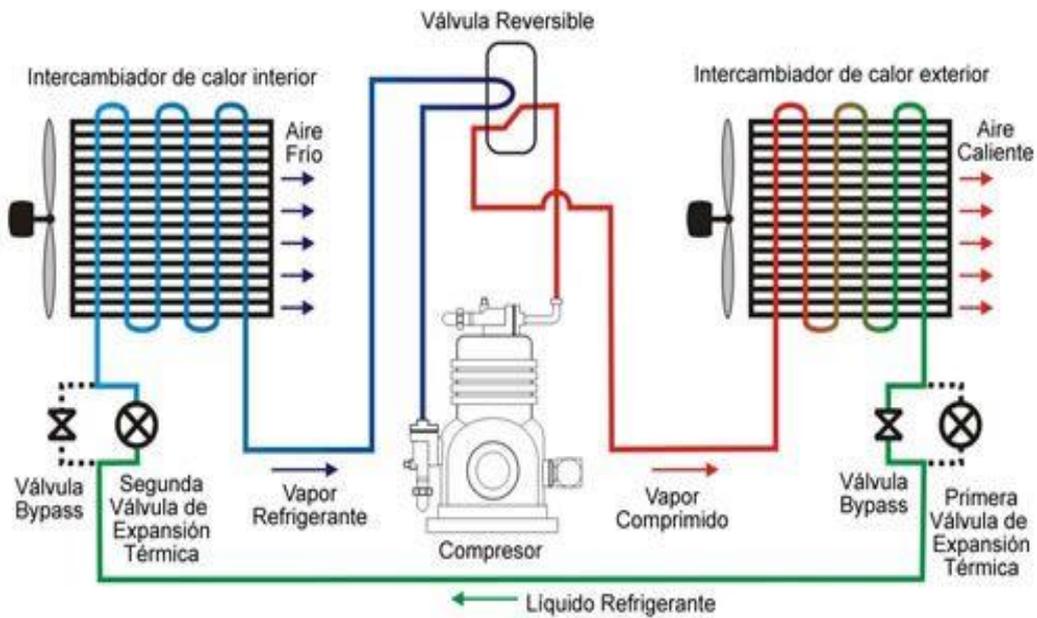
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.006>

Zheng et al. (2011). A Simple Method to Calculate Vehicle Heat Load. *SAE Technical Paper 2011-01-0127*. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0127>

Zheng, Y., Mark, B., y Youmans, H. (2011). A Simple Method to Calculate Vehicle Heat Load. *SAE Technical Paper 2011-01-0127*, 8. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0127>

Anexos

A.1. Esquema del sistema de aire acondicionado



Equipo trabajando en frío

A.2. Componentes del sistema de aire acondicionado



A.3. Modelacion y control de un sistema de aire acondicionado

