

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i1>

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Influence of the geometry and size of the air conditioning outlet grids on the distribution of temperatures in a vehicle cabin

Influência da geometria e tamanho das grades de saída de ar condicionado na distribuição de temperaturas na cabine de um veículo

Denys Cajo-Toctaquiza ^I

denyscajo@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-3303-988X>

Paúl Montúfar-Paz ^{III}

paulmontufar@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9062-8704>

Daniela C. Vásconez-Núñez ^{II}

danielcvasconez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1898-9529>

Fernando M. Tello-Oquendo ^{IV}

fernando.tello@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2551-9648>

Correspondencia: fernando.tello@epoch.edu.ec

* **Recibido:** 23 de enero de 2023 * **Aceptado:** 09 de febrero de 2023 * **Publicado:** 28 de marzo de 2023

- I. GX Motor, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Industrial, Grupo GIDENM, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo GEA, Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo GIDENM, Riobamba, Ecuador.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis CFD de la distribución del flujo de aire acondicionado en la cabina de un vehículo. Se desarrolló un modelo geométrico 3D de la cabina de un vehículo que representa el volumen de la cabina y las dimensiones de las superficies internas y externas. Por otro lado, se implementó un modelo termodinámico para estimar la variación de temperatura del aire interior en función de la carga térmica y las condiciones ambientales. El modelo fue validado con pruebas experimentales considerando la radiación solar, la temperatura ambiente exterior y la temperatura del aire interior de la cabina del vehículo, con una desviación máxima de 2.86 °C. Para analizar la distribución del aire del sistema de aire acondicionado (A/C) se realizaron simulaciones con diferentes tamaños y geometrías de las rejillas de salida de aire. Se concluye que la distribución del aire acondicionado en el vehículo mejora con rejillas rectangulares en comparación con las circulares. La mejor distribución del aire acondicionado se consiguió con las rejillas de salida de A/C de forma rectangular en las 4 salidas frontales y 2 salidas adicionales en el compartimento de pasajeros.

Palabras clave: Aire acondicionado automotriz; Distribución de Temperaturas; Dinámica de fluidos computacional (DFC); Rejillas de salida

Abstract

The main objective of this work is to carry out a CFD analysis of the distribution of the air conditioning flow in the cabin of a vehicle. A 3D geometric model of a vehicle cabin was developed that represents the cabin's volume and the dimensions of the internal and external surfaces. On the other hand, a thermodynamic model was implemented to estimate the variation in indoor air temperature as a function of thermal load and environmental conditions. The model was validated with experimental tests considering solar radiation, the outside ambient temperature, and the interior air temperature of the vehicle cabin, with a maximum deviation of 2.86 °C. To analyze the air distribution of the air conditioning (A/C) system, simulations were conducted with different sizes and

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

geometries of the air outlet grids. It is concluded that the distribution of air conditioning in the vehicle improves with rectangular outlet grids compared to circular ones. The best air conditioning distribution was achieved with the rectangular-shaped A/C outlet grids on all 4 front outlets and 2 additional outlets in the passenger compartment.

Keywords: Automotive air conditioning; Temperature distribution; Computational Fluid Dynamics (CFD); Outlet grilles

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise CFD da distribuição do fluxo de ar condicionado na cabine de um veículo. Foi desenvolvido um modelo geométrico 3D da cabine de um veículo que representa o volume da cabine e as dimensões das superfícies interna e externa. Por outro lado, um modelo termodinâmico foi implementado para estimar a variação da temperatura do ar interior em função da carga térmica e das condições ambientais. O modelo foi validado com testes experimentais considerando a radiação solar, a temperatura ambiente externa e a temperatura do ar interior da cabine do veículo, com desvio máximo de 2,86 °C. Para analisar a distribuição do ar do sistema de ar condicionado (A/C), foram realizadas simulações com diferentes tamanhos e geometrias das grades de saída de ar. Conclui-se que a distribuição do ar condicionado no veículo melhora com grades de saída retangulares em comparação com as circulares. A melhor distribuição do ar condicionado foi conseguida com as grelhas de saída A/C de formato retangular nas 4 saídas dianteiras e 2 saídas adicionais no habitáculo.

Palavras-chave: Ar condicionado automotivo; Distribuição de temperatura; Fluidodinâmica Computacional (CFD); Grelhas de saída

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Introducción

Los vehículos se han convertido en un recurso indispensable para los seres humanos, por tal motivo, los fabricantes de vehículos incrementan esfuerzos para asegurar el confort térmico del conductor y sus acompañantes. De acuerdo con Frank et al. [1], las personas pasan de 1 a 10 horas cada día en el interior de un vehículo. Los factores que influyen en el confort térmico son ventanas más grandes, confort acústico, habitáculos más grandes y principalmente un sistema de aire acondicionado que regule la temperatura y la humedad relativa del aire en el interior de la cabina del vehículo. La distribución del aire que se forma en este modo suele causar graves problemas de confort térmico y de consumo de energía.

En la actualidad, para modelar y caracterizar completamente un sistema de aire acondicionado se utilizan programas de dinámica de fluidos computacionales (CFD), con los cuales se puede analizar la distribución del aire climatizado dentro del vehículo, consecuentemente se reduce el tiempo de desarrollo de los sistemas de climatización automotriz [2]. El desempeño de este sistema se puede analizar y optimizar, modelando térmicamente la cabina del vehículo, considerando las características geométricas y constructivas del vehículo.

Los modelos 3D se emplean para analizar en detalle los aspectos de confort térmico, mientras que los modelos de parámetros agrupados son más apropiados para la integración del modelo de cabina con el sistema de A/C o un sistema de control. Puesto que los modelos de parámetros agrupados suponen que las propiedades del aire están distribuidas uniformemente, ofrecen una mejor relación de compromiso entre la precisión y el costo computacional del modelo ([3], [4]).

Zhiyuan Chang [5] desarrolló un método para evaluar el rendimiento de la distribución de aire acondicionado en un metro; los autores realizaron una simulación del flujo de aire, evaluaron el rendimiento de la distribución del aire para el modo de ventilación híbrido, y se comparó con el modo de ventilación tradicional. Los resultados muestran que, en comparación con el modo de ventilación tradicional, el modo de ventilación híbrido tiene una distribución más uniforme de la temperatura, un mejor confort térmico, una mayor eficiencia en la utilización de la energía y un menor grado de cortocircuito del aire de suministro. Tong-Bou Chang et al. [6] realizaron varias simulaciones de

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

dinámica de fluidos computacional (CFD) para investigar la calidad del aire interior (IAQ) en la cabina de un vehículo compacto de pasajeros, bajo varios modos de ventilación/circulación. Propusieron una estrategia de ventilación para mantener la concentración de CO₂ en la cabina entre 1000 ppm y 2000 ppm. Los resultados muestran que a medida que aumenta el número de personas en la cabina, se incrementa la frecuencia con la que es necesario cambiar entre los dos modos de ventilación. Sin embargo, la concentración de partículas se reduce significativamente a medida que aumenta la eficacia de filtración del filtro de aire. Yiyi Mao et al. [7] realizaron una modelación numérica transitoria de la cabina de un vehículo eléctrico, para predecir la variación de temperatura en el interior de la cabina del vehículo. El análisis de las distribuciones de temperatura y velocidad del aire del modelo transitorio mostró que el almacenamiento térmico en el asiento afectaba significativamente al confort térmico para las condiciones transitorias. El movimiento del vehículo aumentó la transferencia de calor por convección en la superficie exterior de la cabina, lo que incrementó la transferencia de calor entre el aire exterior y el interior y prolongó el tiempo de ajuste del confort térmico. Ko et al. [8] modelaron el sistema A/C acoplado a la cabina de un vehículo para estudiar el consumo de energía durante la puesta en marcha del sistema; determinaron que si la temperatura inicial de la cabina disminuye de 25 °C a 21 °C, el compresor consume un 58% más de energía y el tiempo de pull-down aumenta un 23%. Por otro lado, el aumento de la humedad relativa del 33% al 66% aumenta el consumo de energía del sistema A/C. El modelado CFD ha sido ampliamente utilizado para simular el flujo de aire interior y el transporte de contaminantes en ambientes interiores ([9], [10], [11]).

El presente trabajo tiene como objetivo utilizar el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para visualizar y analizar la distribución de flujos de aire acondicionado en el interior de la cabina de un vehículo. Se realizó un modelo geométrico en SolidWorks y un modelo termodinámico en Ansys. Se realizaron dos etapas experimentales para validar el modelo. Una vez validado el modelo se realizaron varias simulaciones para analizar la distribución del aire acondicionado dentro del vehículo modificando el tamaño y la geometría de rejillas de aire.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Materiales y métodos

En la Fig. 1 se muestra la metodología utilizada para el estudio de la influencia de la geometría y tamaños de rejillas en la distribución de flujos de aire acondicionado en el interior de un vehículo. Primeramente, se realizó una investigación exhaustiva sobre el estado del arte acerca de análisis CFD de la distribución de flujos de aire acondicionado y para la obtención de datos experimentales sobre evolución de temperaturas interiores que se utilizaron para la validación del modelo termodinámico.

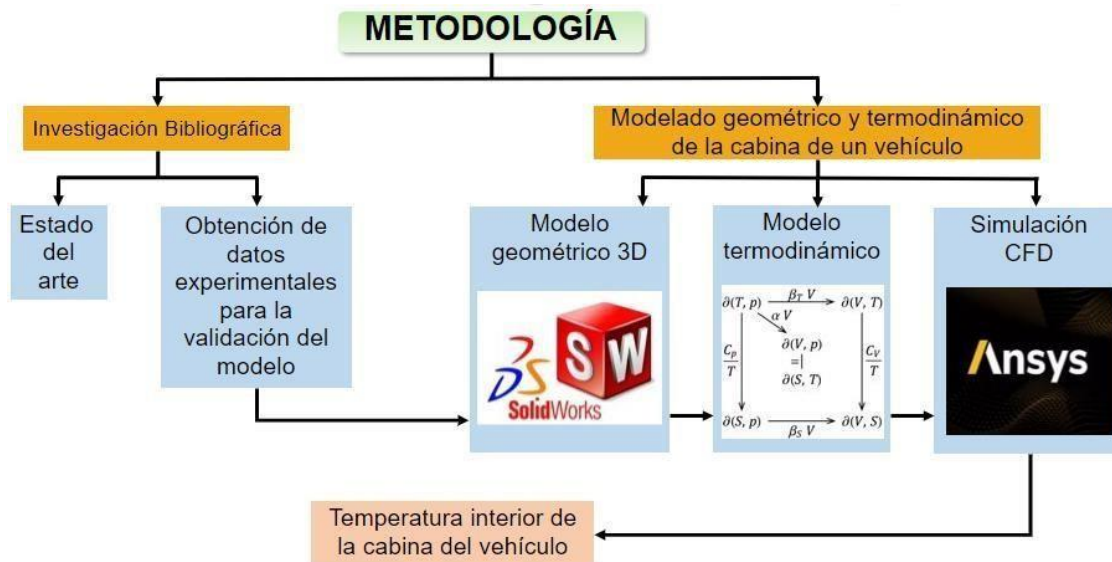


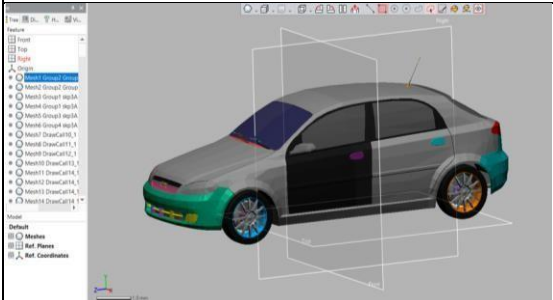
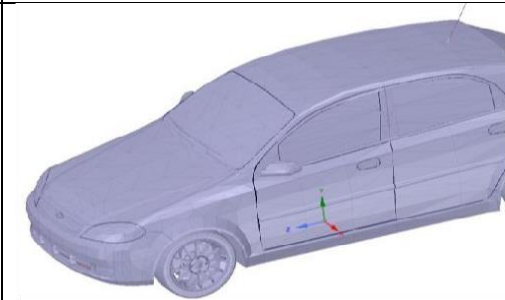


Fig. 1. Diagrama de la metodología desarrollada para el análisis CFD

El vehículo que se utilizó para el modelado geométrico y termodinámico fue un vehículo tipo sedán Chevrolet Optra Hatchback, de 1800cc, año 2008, 5 puertas; que tiene un sistema de A/C con 4 rejillas circulares de salida de aire en la parte frontal del panel delantero, como se observa en la Fig. 2.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

	
<p>Fig. 2. <i>Chevrolet Optra Hatchback</i></p> <p>Fuente: (Thenewsheel, 2014).</p>	<p>Fig. 3. Geometría 3D de puerta delantera entregado por Scanner 3D iSense</p>
	
<p>Fig. 4. Modelo geométrico entregado por Geomagic Design X</p>	<p>Fig. 5. Modelo geométrico 3D en SpaceClaim</p>

Los detalles internos de la geometría del vehículo se registraron utilizando una cámara 3D, con la cual se escaneó cada superficie de la carrocería como se ilustra en la Fig. 3. Los modelos de cada parte de la carrocería se integraron mediante el software Geomagic Design, con la cual se unieron las geometrías de cada una de las superficies escaneadas con la cámara 3D. La Fig. 4 muestra la interfaz del software Geomagic Design en donde se muestra la geometría 3D integrada en su totalidad. Posteriormente, la geometría del vehículo fue reparada con el software SolidWorks.

Una vez terminado el modelo de la geometría 3D del vehículo, se extrajo el volumen de la cabina del vehículo en el cual se va a trabajar la simulación CFD, utilizando SpaceClaim de Ansys, el cual es un software que permite trabajar archivos, repararlos, ajustar su malla en facetas, y a la misma vez

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

convertirlos en sólidos o superficies que se puedan trabajar en una simulación, como se muestra en la Fig. 5.

El modelo termodinámico de la cabina del vehículo se implementó en Ansys, para lo cual se calcularon las ganancias térmicas a través de las superficies del vehículo. Cada resistencia térmica de las superficies depende de los mecanismos de transferencia de calor presentes. Para calcular los flujos de calor en las superficies del vehículo se tomaron en cuenta las características geométricas del vehículo y el valor de la conductividad térmica de cada material. La Tabla 1 describe las características geométricas del vehículo utilizado en el estudio.

Tabla 1: Características geométricas de la cabina del vehículo.

Superficie	Longitud característica (m)	Área (m ²)
Puerta delantera y posterior derecha	0.73	1.45
Puerta delantera y posterior izquierda	0.73	1.45
Techo	0.29	1.44
Piso	0.41	1.12
Ventana delantera derecha e izquierda	0.41	0.35
Ventana posterior derecha e izquierda	0.41	0.33
Parabrisas delantero	0.83	0.99
Parabrisas posterior	0.56	0.84
Panel frontal	0.50	0.28
Tapizado de puertas delanteras Tapizado	0.73	1.45
de puertas posteriores	0.73	1.45
Asientos	0.28	0.53

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Tapizado de techo	0.29	1.44
Tapizado de piso	0.41	1.12

Para determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección se tomaron en cuenta varios factores como las dimensiones de las superficies del vehículo, la temperatura ambiente y del fluido, propiedades del fluido (densidad, viscosidad, conductividad térmica), propiedades del material (conductividad térmica) y la velocidad del vehículo. La Tabla 2 muestra los materiales considerados para las superficies del habitáculo y sus propiedades térmicas.

Tabla 2: Materiales de la cabina del vehículo y propiedades térmicas.

Superficie	Material	Espesor(m)	Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Techo, puertas	Acero	0.0018 - 0.002	54.2
Parabrisas delantero y posterior, ventanas laterales	Vidrio	0.004	1.11
Panel frontal, tapizado de puertas	Plástico ABS	0.0015 - 0.002	0.144
Asientos, tapizado del techo, tapizado del piso posterior	Tela	0.002 - 0.004	0.3

En este modelo se consideró convección natural en la parte externa puesto que el vehículo estuvo estacionado; en la parte interna del habitáculo se consideró convección forzada porque existe una interacción directa con el ventilador del sistema de aire acondicionado. El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) se calcula según la ecuación (1), donde Nu = Número de Nusselt, k = Conductividad térmica del fluido [W/mK] y L_c = Longitud característica [m].

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

$$h = \frac{Nu * k}{L_c}$$

El número de Nusselt se calcula usando correlaciones que dependen del número de Rayleigh (Ra), del número de Prandtl (Pr), del flujo y de la superficie considerada. También, se consideró el tipo de convección (natural o forzada). Las correlaciones para la convección natural y convección forzada están en función del tipo de flujo. Las correlaciones para calcular el número de Nusselt se describen en la Tabla 3.

Tabla 3: Correlaciones de números de Nusselt para la convección natural y forzada. [12]

Convección natural		
Superficies	Intervalo de Ra	Nu _L
Verticales	Todo intervalo	$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.837 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/6}]^{9/8}} \right\}^{4/5}$
Inclinadas		Utilícense las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente. Reemplácese g por g cos θ para 0 < θ < 60°
Horizontales	10 ⁷ ≤ Ra _L ≤ 10 ¹¹ , todo Pr	Superficie superior de la placa caliente Nu _L = 0.15 Ra _L ^{1/3}
	10 ⁴ ≤ Ra _L ≤ 10 ⁷ , Pr ≥ 0.7	Superficie inferior de la placa caliente Nu _L = 0.54 Ra _L ^{1/4}
Convección forzada		
Flujo	Intervalo de Re	Nu _L

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Laminar	$5 \times 10^5 \geq Re_L$	$Nu_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$
Turbulento	$5 \times 10^5 \leq Ra_L \leq 10^7$	$Nu_L = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$

La carga térmica total se calcula sumando las ganancias térmicas en cada superficie opaca y acristalada del vehículo.

Ensayos experimentales de temperatura interior y exterior

Para medir las temperaturas interior y exterior se estacionó el vehículo en el exterior, expuesto directamente a los rayos del sol, sin la influencia de las sombras. Se colocaron 10 sensores de temperatura, 8 en el interior y 2 en el exterior de la cabina del vehículo. La Fig. 6 muestra la posición de los sensores dentro de la cabina del vehículo, ubicados principalmente en los asientos y los reposacabezas. Para el registro de los datos de temperatura se programó un Arduino que se comunica con LabView para la adquisición de datos (ver Fig. 7). El equipo de registro de temperaturas está compuesto de los siguientes elementos:

- Arduino Mega 2560 la cual permite comunicarnos con el ordenador y otros microcontroladores.
- Sensores de temperatura Ds18b20 digitales sumergibles con una incertidumbre de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ en el rango de 10°C a 85°C , los cuales son usados para medir temperatura ambiente o para diferentes pruebas, de acuerdo con Marcos et al. [9].
- Resistencias Pull-up de $4.7 \text{ k}\Omega$ para la conexión de los sensores Ds18b20, la resistencia Pull-up varía de acuerdo con la longitud del cable que se conecte al sensor.
- Conectores bloque de dos terminales para fijar los cables de los sensores a la protoboard para evitar que hagan falsos contactos al momento de recoger los datos.
- Protoboard para soportar las resistencias, el conector bloque y la placa Arduino.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

<p>Fig. 6. Ubicación de los sensores de temperatura en el vehículo.</p>	<p>Fig. 7. Esquema del equipo de medición y registro de temperaturas.</p>

La recolección de datos de la temperatura se realizó mediante la programación en Arduino (Ver Fig. 8), en intervalos de tiempo. La Fig. 9 muestra el diagrama de bloques en LabVIEW para la adquisición de datos de temperatura. El equipo NT-312 se utilizó para medir la temperatura y humedad del aire que sale por las rejillas del sistema A/C hacia la cabina del vehículo. Los rangos de temperatura del equipo van desde -10 a 55°C y con una incertidumbre de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Estas mediciones se realizaron en las cuatro rejillas que están instaladas en el interior de la cabina, como se puede observar en la Fig. 10.

<pre> D:\1000_5mm\ void setup() { delay(1000); Serial.begin(9600); sensor1.begin(); sensor2.begin(); sensor3.begin(); sensor4.begin(); sensor5.begin(); sensor6.begin(); sensor7.begin(); sensor8.begin(); sensor9.begin(); sensor10.begin(); } void loop() { sensor1.requestTemperatures(); String sensor1 = String(sensor1.getTempByIndex(0), 1); Serial.print("A" + sensor1); sensor2.requestTemperatures(); String sensor2 = String(sensor2.getTempByIndex(0), 1); Serial.print("B" + sensor2); </pre>	
<p>Fig. 8. Programación en Arduino</p>	<p>Fig. 9. Diagrama de bloques en LabVIEW para la recolección de datos de temperatura</p>

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo



Fig. 10. Medición de temperatura y humedad a la salida del A/C

Validación del modelo de la cabina del vehículo

El modelo de la cabina del vehículo se validó comparando la evolución de los datos de la predicción de la temperatura interior de la cabina del modelo con la variación de la temperatura interior experimental de la cabina.

Los datos experimentales que se utilizaron en la validación se midieron los días 11, 12, 13 y 17 de noviembre del 2020 desde las 10:00 hasta las 15:00 horas; en esta franja horaria hay mayor incidencia de la radiación solar en el día.

La parte experimental se ejecutó en dos etapas, la primera etapa de calentamiento en la que la radiación solar incide sobre las superficies del automóvil incrementando su temperatura interior y la segunda etapa es la de enfriamiento que consistía en encender el sistema A/C con el objetivo de observar el descenso de la temperatura interior de la cabina del automóvil.

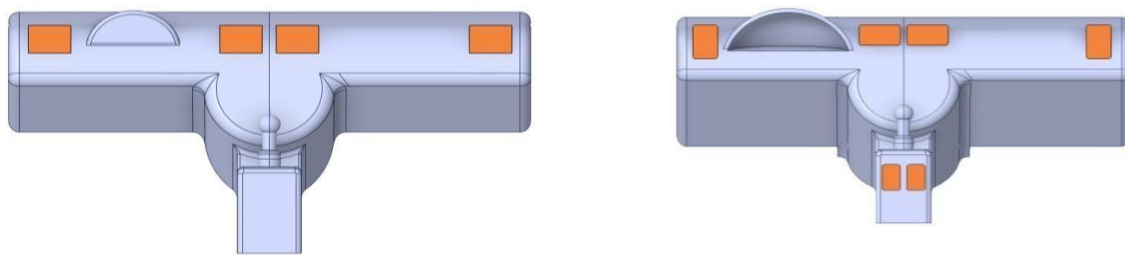
Finalmente, se realizó una comparación de la curva de temperatura experimental y del modelo para validar el modelo realizado.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Estimación de la distribución de A/C con geometrías y tamaños diferentes en las rejillas de salida de A/C

El análisis de la distribución de aire acondicionado en el interior del vehículo se realizó mediante el software Ansys, que nos permite realizar una simulación CFD para poder analizar el flujo de aire en un modelo geométrico 3D.

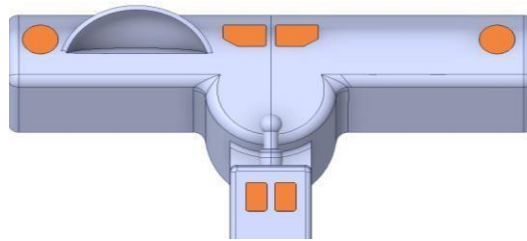
La simulación CFD del modelo geométrico 3D del vehículo se realizó con el software Discovery Live de Ansys, que es una herramienta de diseño basada en simulación multifísica integrada de alta fidelidad y bajo coste computacional. Discovery Live agrupa todo esto en un solo entorno que es fácil y rápido de usar; por ejemplo, en caso de requerir modificar la geometría, cambiar el tamaño de malla, modificar las condiciones de frontera e incluso la presentación de resultados se los puede apreciar en ese momento gracias a que cuenta con simuladores en tiempo real y sin tener que cerrar del programa. Además, se realizaron estudios analizando diferentes posiciones, tamaños y geometrías de las rejillas de salida de aire para evaluar los efectos y cambios que se provocan al adoptar diferentes condiciones. Una vez validado el modelo geométrico y termodinámico de la cabina del vehículo, se realizaron dos análisis de la distribución del flujo de aire en el interior de la cabina de un vehículo. Un primer análisis contempló la modificación de la geometría de las rejillas que se muestran en la Fig 11. El segundo análisis contempló la variación de los tamaños de las rejillas (forma rectangular y circular) de salida del aire acondicionado.



a) Geometría 1

b) Geometría 2

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo



c) Geometría 3

Fig. 11. Geometría de las rejillas analizadas para este estudio

En la Fig.11, la geometría 1 corresponde a las rejillas de salida de A/C de forma rectangular en las 4 salidas; la geometría 2 corresponde a rejillas de salida de A/C de forma rectangular en las 4 salidas y 2 salidas rectangulares adicionales para el compartimento de los pasajeros; y la geometría 3 corresponde a las rejillas de salida de A/C, dos de forma circular en los extremos y dos de forma rectangular en la mitad del panel frontal; adicionalmente, dos salidas rectangulares para el compartimento de los pasajeros.

Resultados y discusión

Validación experimental del modelo CFD para la determinación de la temperatura interior de la cabina

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

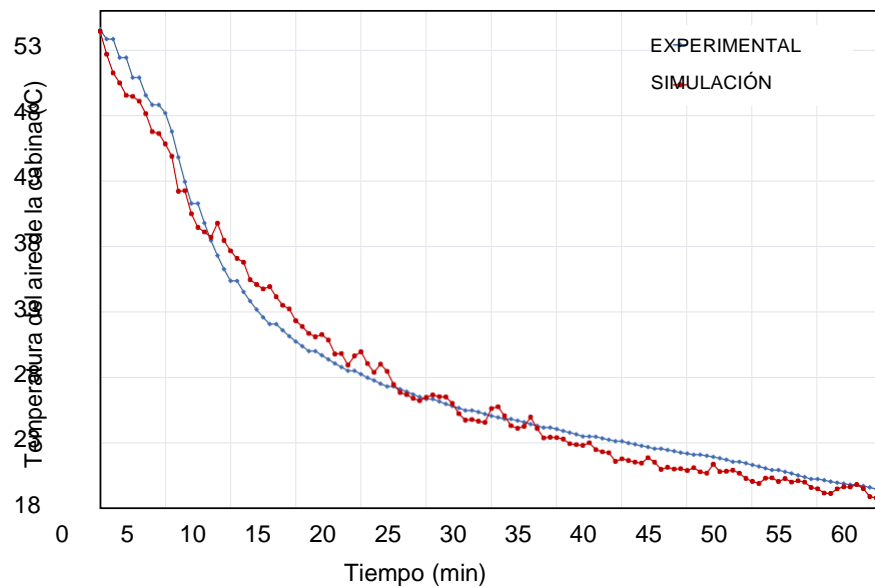


Fig. 12. Comparación de los resultados experimentales y de simulación del modelo CFD de la temperatura interior del vehículo.

La Fig. 12 muestra los resultados de la evolución de la temperatura experimental del aire interior de la cabina del vehículo y los resultados del modelo de la cabina. Se observa que el modelo predice correctamente las variaciones de temperatura en el interior de la cabina del vehículo. La temperatura experimental del aire a los 60 mins es de 19.43 °C y la del modelo es de 18.88 °C. La desviación máxima de temperatura es de 2.86 °C; el error máximo y error medio cuadrático (RMS) en la estimación del modelo es de 1.12 % y 1.24 %, respectivamente.

Distribución de salida del aire del sistema A/C con varias geometrías en las rejillas de salida de A/C

La Fig. 13 muestra la evolución de la temperatura interior del aire para varias geometrías de las rejillas de salida. Para la geometría 1, se puede observar que la temperatura desciende de forma similar a la curva experimental. La temperatura final al completar los 60 minutos de simulación es de 18,48°C;

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

lo que supone 1°C menos que la curva experimental. Este comportamiento implica que con la geometría 1 se demorará más en alcanzar la temperatura de confort que es de 22°C .

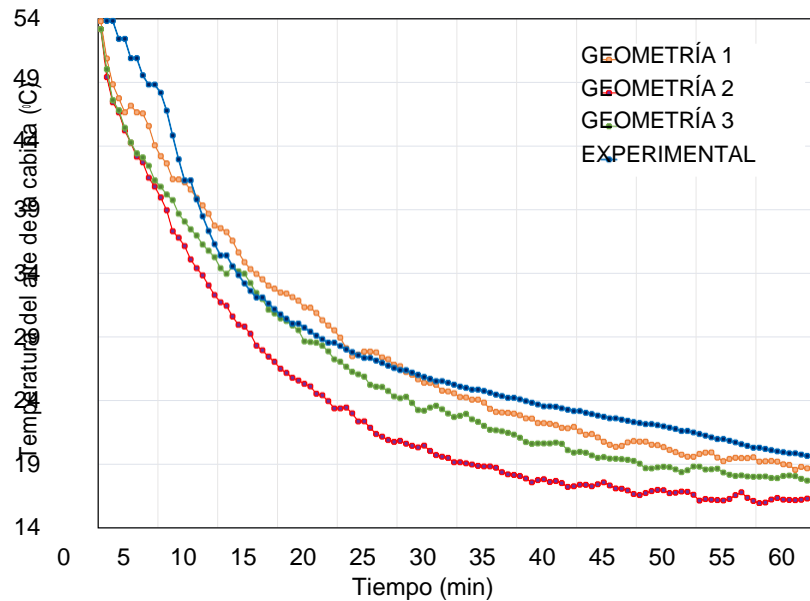


Fig. 13. Evolución de la temperatura del aire interior de la cabina con diferentes geometrías de rejillas de salida de aire.

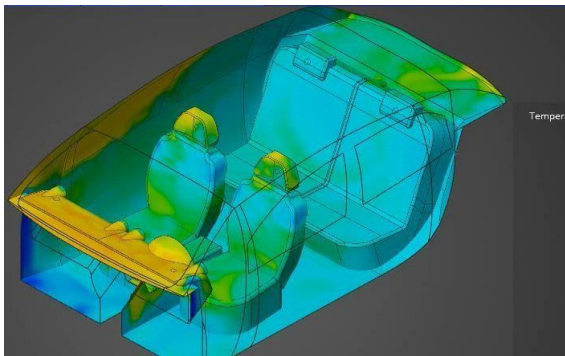
Para la geometría 2, se muestra una mejor distribución de A/C en relación con los demás casos porque la temperatura interior desciende en menor tiempo. En este caso, al agregar 2 rejillas de salidas de A/C para el compartimento de los pasajeros, se disipan de mejor manera las altas temperaturas presentes en el interior del habitáculo, lo que implica una disminución de uso del sistema de A/C. Para este caso la temperatura final de la simulación es de $15,94^{\circ}\text{C}$ con una diferencia de $3,49^{\circ}\text{C}$ respecto a la curva experimental.

Para la geometría 3, al ubicar 2 rejillas de forma rectangular para el compartimento de los pasajeros contribuye a disipar el calor en dicho compartimento; la temperatura final de la simulación es de $17,60^{\circ}\text{C}$, teniendo así una diferencia de $1,83^{\circ}\text{C}$ con respecto a la curva experimental; sin embargo, el

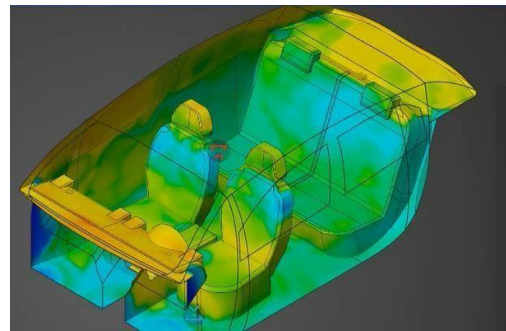
Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

uso de dos rejillas de forma circular en los extremos del panel frontal no asegura una mejor disipación del calor en el compartimento delantero.

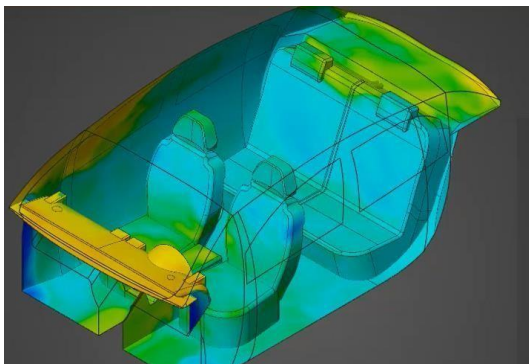
La Fig. 14 muestra la distribución de la temperatura interior de la cabina al encender el sistema de aire acondicionado y variar las geometrías de rejillas de salida del aire, a los 15 minutos de enfriamiento de la cabina.



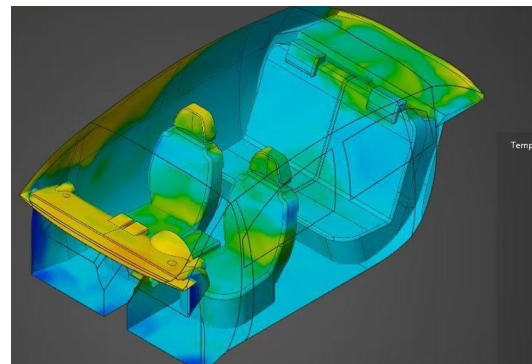
a) Geometría original: rejillas circulares



b) Geometría 1: con 4 rejillas rectangulares.



c) Geometría 2: con 6 rejillas rectangulares



d) Geometría 3: con 2 rejillas circulares y 4 rejillas rectangulares

Fig. 14. Distribución de temperatura para diferentes geometrías de rejillas después de 15 minutos de enfriamiento

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Con respecto a la geometría 1, la temperatura a los 15 minutos de enfriamiento es de 32.47 °C, con una diferencia de +1.71 °C con respecto a la geometría original. Aunque la diferencia de temperaturas es mínima, la distribución del aire dentro de la cabina es diferente. En los asientos delanteros la temperatura alcanza hasta 35 °C y en los traseros hasta los 31 °C, mientras que con la geometría original se tienen temperaturas de alrededor de 36 °C y 26 °C, respectivamente. La diferencia de temperaturas es de 1 a 5 °C entre la forma circular y rectangular.

Con la geometría 2, la temperatura a los 15 minutos de enfriamiento es de 26.49 °C, con una diferencia de -4.27 °C con respecto a la geometría original. La diferencia de temperaturas es importante, la distribución del aire dentro de la cabina es diferente. En los asientos delanteros la temperatura alcanza hasta 31 °C y en los traseros hasta los 22 °C. Se observa que al agregar las 2 rejillas adicionales para el compartimento posterior el efecto de enfriamiento es mucho más rápido, los asientos posteriores ya presentan una temperatura por debajo de los 24°C, mientras que en el compartimento delantero la temperatura desciende de forma gradual y lentamente.

En la geometría 3, la colocación de dos rejillas rectangulares en el habitáculo permite disipar mejor el calor, pero con dos rejillas circulares en los bordes del panel frontal, son invisibles y ayuda a disipar el calor en el habitáculo delantero, ya que este compartimento experimenta mayor radiación solar y temperaturas dependiendo de la orientación del vehículo. En este caso, la temperatura de la simulación es de 30.44 °C, con una diferencia de -0.32 °C respecto a la geometría original. En los asientos delanteros la temperatura alcanza hasta 31 °C y en los traseros hasta los 22 °C. De esto podemos concluir que, cambiando la forma, el tamaño y agregando rejillas de salida de aire, podemos alcanzar una temperatura agradable en menos tiempo. El flujo de A/C se distribuye por toda la cabina, llegando a áreas a las que el flujo de A/C no puede llegar.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

Distribución del aire del sistema A/C con diferentes tamaños en las rejillas de salida de A/C

Se consideraron 2 tamaños de rejillas de salida de A/C, de geometrías circulares y rectangulares para estudiar los cambios en el flujo de aire y distribución de temperatura en el habitáculo.

Para rejillas circulares se consideraron dos tamaños adicionales al original de 75 mm de diámetro (simulación). El tamaño 1, es de 40 mm de diámetro y el tamaño 2 es de 55 mm de diámetro. La Fig. 15 muestra la evolución de la temperatura del aire interior de la cabina con los tres tamaños de rejillas circulares. En la figura se observa que las temperaturas con las rejillas del tamaño 1 son superiores a los otros dos tamaños. Sin embargo, las temperaturas del aire con las rejillas de tamaño 2 y el de simulación se acercan más, siendo las temperaturas con las rejillas de 75 mm ligeramente inferiores a las del tamaño 2. Este comportamiento se debe a que al reducir el área de flujo del aire la velocidad se incrementa, elevando la turbulencia del flujo y permitiendo una adecuada distribución del aire en todo el habitáculo. Estos resultados muestran que existe la posibilidad de reducir el tamaño de las rejillas circulares sin sacrificar la distribución de temperaturas en el habitáculo. Al término de los 60 minutos de simulación, con el tamaño de simulación se registra una temperatura de 18,88°C; mientras que, para el tamaño 1 alcanzó una temperatura de 24,96°C y con el tamaño 2 se registró una temperatura de 19,72°C, es decir, 6.08 y 0.84°C de diferencia con la geometría original, respectivamente.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

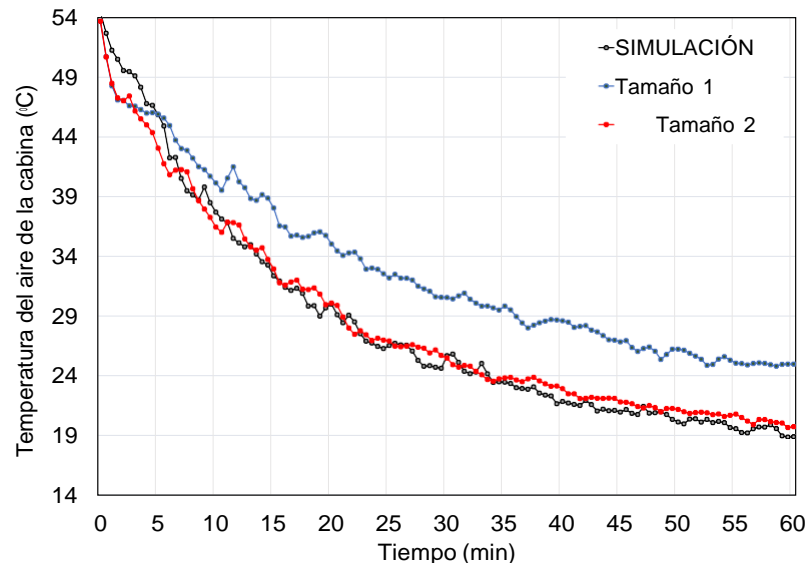
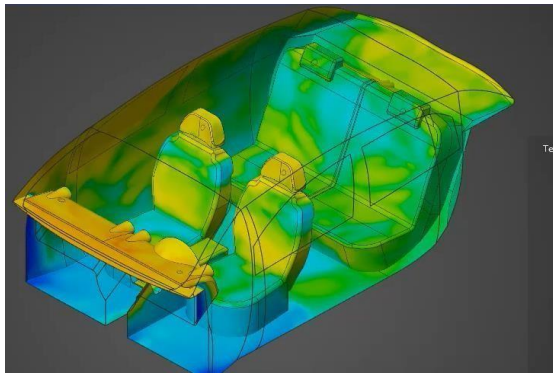


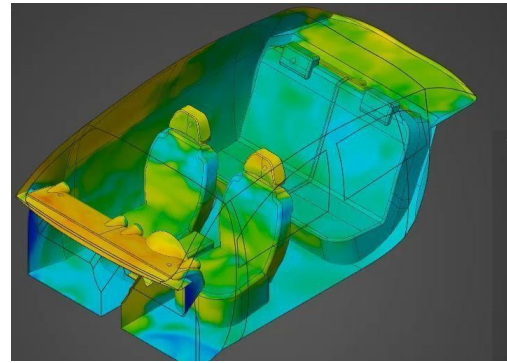
Fig. 15. Evolución de la temperatura del aire interior de la cabina con diferentes tamaños de rejillas circulares. Simulación: 75 mm, Tamaño 1: 40 mm de diámetro, Tamaño 2: 55 mm de diámetro.

En la Fig. 16 se ilustra la distribución de temperaturas en el habitáculo después de 15 minutos de enfriamiento con los tamaños 1 y 2 de rejillas circulares. Se observa una diferencia de temperatura al comparar las dos curvas de temperatura en las dos figuras. Con rejillas de 55 mm de diámetro (Fig. 16 (b)) se consiguen temperaturas inferiores en los asientos de piloto y pasajeros que con rejillas de 40 mm de diámetro (Fig. 16 (a)), aproximadamente 6 °C de diferencia. Por lo tanto, un cambio en el diámetro de la rejilla permitirá que el tiempo que se requiera para llegar a la temperatura de confort variará, siendo menor con rejillas de 55 mm de diámetro.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo



a) Tamaño 1: Rejillas circulares de 40 mm de diámetro



b) Tamaño 2: Rejillas circulares de 55 mm de diámetro

Fig. 16. Contornos de temperatura para diferentes diámetros en las rejillas circulares después de 15 minutos de enfriamiento

Para rejillas rectangulares, se consideraron dos tamaños adicionales al de referencia de 80x55 mm y 90x55 mm para las rejillas de los extremos y de la mitad del panel frontal, respectivamente (geometría 2). El tamaño 3, tiene las dimensiones de 50x25 mm y 60x25 mm y el tamaño 4 tiene las dimensiones de 60x35 mm y 70x35 mm. Los tamaños de las rejillas del reposabrazos no se modificaron. La Fig. 17 muestra la evolución de la temperatura del aire interior de la cabina con los tres tamaños de rejillas rectangulares. En la figura se observa que las temperaturas con las rejillas del tamaño 3 son superiores a los otros dos tamaños. Sin embargo, las temperaturas del aire con las rejillas de tamaño 4 y el de la geometría 2 se acercan más al término de los 60 mins, siendo las temperaturas con las rejillas de 80x55 mm y 90x55 mm ligeramente inferiores a las del tamaño 4, sobre todo desde los 10 a los 40 mins. Al término de los 60 minutos de simulación, con el tamaño de geometría 2 se registra una temperatura de 16,24°C al igual que la temperatura del tamaño 4; mientras que, para el tamaño 3 alcanzó una temperatura de 19,87°C.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

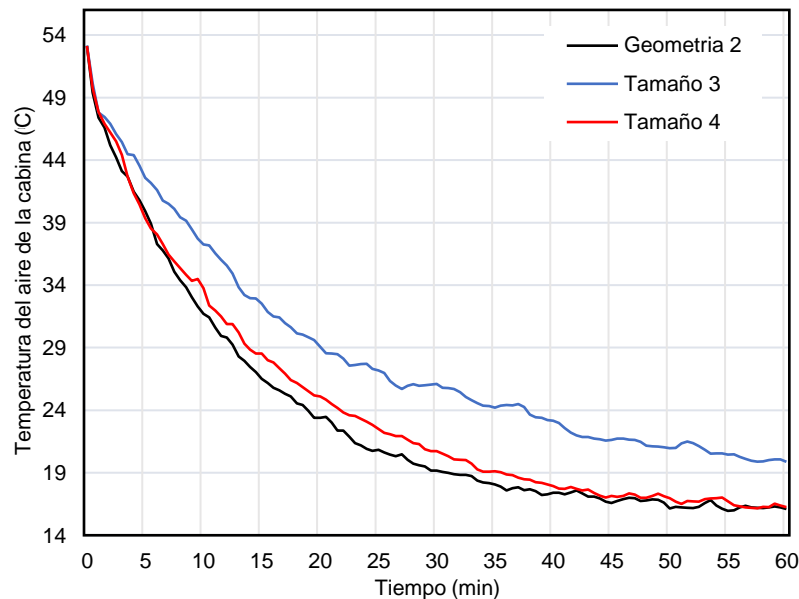
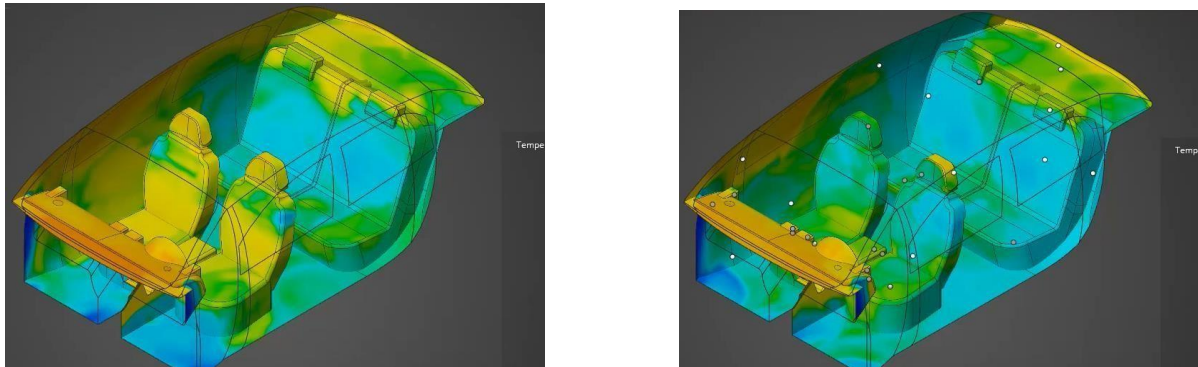


Fig. 17. Evolución de la temperatura del aire interior de la cabina con diferentes tamaños de rejillas rectangulares. Geometría 2: 80x55 mm y 90x55 mm, Tamaño 3: 50x25 mm y 60x25 mm, Tamaño 4: 60x35 mm y 70x35 mm.

La Fig. 18 muestra los contornos de temperatura en el interior del habitáculo después de transcurridos 15 minutos de enfriamiento con los tamaños 3 y 4 de rejillas rectangulares. Se observa una diferencia de temperatura al comparar las dos curvas de temperatura en las dos figuras. Con rejillas de 60x35 mm y 70x35 mm (Fig. 18 (b)) se consiguen temperaturas inferiores en los asientos de piloto y pasajeros que con rejillas de 50x25 mm y 60x25 mm (Fig. 18 (a)), aproximadamente 4.94 °C de diferencia. Como se esperaba, una mayor área de salida del aire acondicionado permite conseguir temperaturas más bajas. Por otro lado, en las figuras se observa que las rejillas de tamaño 3 consiguen enfriar los asientos de pasajeros traseros hasta temperaturas similares que el tamaño 4, no así en los asientos delanteros en los cuales se verifica una diferencia notable. Por lo tanto, el tamaño 4 consigue una distribución de temperaturas más uniforme durante el enfriamiento de la cabina.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo



a) Tamaño 3: Rejillas rectangulares de 50x25 mm y 60x25 mm.

a) Tamaño 4: Rejillas rectangulares de 60x35 mm y 70x35 mm.

Fig. 18. Contornos de temperatura para diferentes dimensiones de rejillas rectangulares después de 15 minutos de enfriamiento

Conclusiones

En el presente estudio se realizó el análisis de la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo para varios tamaños y geometrías de las rejillas de salida del aire acondicionado. Para considerar los detalles geométricos de las superficies del habitáculo, se implementó un modelo 3D de la cabina de un vehículo sedán utilizando un scanner 3D iSense. Se utilizó el software SolidWorks para unir las partes de la cabina escaneadas y el software SpaceClaim de Ansys para modelar térmicamente la cabina del vehículo y analizar la variación de temperatura del aire interior bajo varias condiciones ambientales con el sistema de aire acondicionado encendido. La validación del modelo se realizó utilizando medidas experimentales de temperatura interior y exterior. Se utilizaron 10 sensores, 8 colocados en el interior del habitáculo en los asientos y las rejillas de salida del aire acondicionado y 2 en el exterior para medir la temperatura exterior. Del presente estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

- El modelo termodinámico de la cabina del vehículo estima la evolución de la temperatura interior en el enfriamiento con una desviación máxima de 2.86 °C, consiguiendo un error máximo y error medio cuadrático de 1.12 % y 1.24 %, respectivamente.
- La temperatura del aire en el interior de la cabina del vehículo está directamente relacionada con la geometría de las rejillas y su tamaño. Con rejillas de salida de A/C rectangulares, 4 salidas frontales y 2 en el compartimento de los pasajeros (geometría 2), se obtiene una mejor distribución de A/C, disipando de mejor manera las altas temperaturas presentes en el interior del habitáculo, lo que implica una disminución de uso del sistema de A/C. La temperatura final de la simulación es de 15,94°C con una diferencia de 3,49°C respecto a la geometría original.
- Considerando rejillas circulares, con un diámetro de 55 mm se consigue que la curva de temperatura tenga una diferencia menor a 1 °C con respecto al tamaño original de rejillas, posibilitando la reducción del tamaño de las mismas.
- Considerando rejillas rectangulares, con rejillas de 60x35 mm y 70x35 mm, en los extremos y de la mitad del panel frontal, respectivamente; se consigue una distribución de temperaturas más uniforme durante el enfriamiento de la cabina. Con una diferencia menor a 1 °C con respecto al tamaño de geometría 2 después de los 40 mins. Con rejillas de menor tamaño (tamaño 3) los asientos delanteros y los de pasajeros tienen distribuciones de temperatura no uniformes.

Referencias

1. L. D. Frank, M. A. Andresen, and T. L. Schmid, "Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars," *Am. J. Prev. Med.*, vol. 27, no. 2, pp. 87–96, 2004, doi: 10.1016/j.amepre.2004.04.011.
2. I. Reda, E. E. Khalil, T. M. Aboudeif, and A. El Degwy, "Air Flow Regimes and Thermal Comfort in Vehicle Cabin Considering Solar Radiation," *Fluid Mech. Open Access*, vol. 04, no. 04, 2017, doi: 10.4172/2476-2296.1000174.
3. B. Torregrosa-Jaime, F. Bjurling, J. M. Corberán, F. Di Sciullo, and J. Payá, "Transient

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

- thermal model of a vehicle's cabin validated under variable ambient conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 45–53, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.074.
4. D. C. Vásconez-Núñez, J. González-Maciá, J. M. Corberán, and J. Payá, "Development and validation of a dynamic thermal model of a minibus using TRNSYS," *Int. J. Veh. Des.*, vol. 77, no. 1–2, pp. 87–107, 2018, doi: 10.1504/IJVD.2018.098272.
 5. Z. Chang, K. Yi, and W. Liu, "A new ventilation mode of air conditioning in subway vehicles and its air distribution performance," *Energy Built Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 94–104, 2021, doi: 10.1016/j.enbenv.2020.06.005.
 6. T.-B. Chang, Y.-S. Lin, and Y.-T. Hsu, "CFD simulations of effects of recirculation mode and fresh air mode on vehicle cabin indoor air quality," *Atmos. Environ.*, p. 119473, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2022.119473.
 7. Y. Mao, J. Wang, and J. Li, "Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 137, pp. 356–367, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.03.099.
 8. J. Ko, K. Thu, and T. Miyazaki, "Transient analysis of an electric vehicle air-conditioning system using CO2 for start-up and cabin pull-down operations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 190, p. 116825, May 2021, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116825.
 9. D. Marcos, F. J. Pino, C. Bordons, and J. J. Guerra, "The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 66, no. 1–2, pp. 646–656, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.054.
 10. A. Warey, S. Kaushik, B. Khalighi, M. Cruse, and G. Venkatesan, "Data-driven prediction of vehicle cabin thermal comfort: using machine learning and high-fidelity simulation results," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 148, p. 119083, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119083.
 11. J. Wu, F. Jiang, H. Song, C. Liu, and B. Lu, "Analysis and validation of transient thermal model for automobile cabin," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 122, pp. 91–102, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.084.
 12. Y. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*. 2013.

Influencia de la geometría y tamaño de las rejillas de salida del aire acondicionado en la distribución de temperaturas en el habitáculo de un vehículo

©2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).|