



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO DE UN MODELO TÉRMICO DE CABINA PARA SU ACOPLAMIENTO EN UN SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICO INTEGRAL DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO

AUTOR: Alejandro Vega Álvarez

TUTOR: Pablo César Olmeda González

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar este espacio para agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado en este camino de mi vida.

En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres el enorme esfuerzo que han realizado día tras día, a lo largo de estos cuatro años, para que yo haya podido llegar hasta este punto. Sin ellos, jamás podría haber conseguido estar aquí.

Además, me gustaría agradecer a Pablo Olmeda por ofrecerme la oportunidad de realizar este trabajo y a Amin Dreif por su enorme e inestimable ayuda durante todo el proyecto.

Por último, no podría dejar de nombrar a mi novia, Julia, quien ha sido un apoyo incondicional, académico y emocional, a lo largo de toda la carrera. Sin duda, ella ha sido quien me ha dado las fuerzas necesarias para seguir adelante en los momentos más duros.

A todos vosotros, muchas gracias.

RESUMEN

El trabajo realizado se encuadra en el marco de un proyecto de simulación integral de un vehículo híbrido. El objetivo principal ha sido desarrollar y validar un modelo térmico de cabina de un turismo. Para la construcción del modelo se ha utilizado la información disponible en literatura.

A continuación, se han definido los estudios más interesantes para demostrar las capacidades del modelo. Estos estudios han sido realizados variando determinadas condiciones de contorno, para determinar su efecto sobre las condiciones térmicas de la cabina.

En el presente trabajo, se detalla el proceso seguido para modelar y validar el modelo, así como para realizar los tres estudios principales sobre el mismo.

La herramienta de modelado y validación que se ha usado a lo largo de todo el trabajo ha sido Matlab.

RESUM

El treball realitzat s'enquadra en el marc d'un projecte de simulació integral d'un vehicle híbrid. L'objectiu principal ha estat desenvolupar i validar un model tèrmic de cabina d'un turisme. Per a la construcció del model s'ha utilitzat la informació disponible a la literatura.

A continuació, s'han definit els estudis més interessants per demostrar les capacitats del model. Aquests estudis han estat realitzats variant determinades condicions de contorn, per determinar el seu efecte sobre les condicions tèrmiques de la cabina.

En el present treball, es detalla el procés seguit per modelar i validar el model, així com per a realitzar els tres estudis principals sobre el mateix.

L'eina de modelatge i validació que s'ha utilitzat al llarg de tot el treball ha estat Matlab.

ABSTRACT

The work carried out is framed within the bodywork of an integral hybrid vehicle simulation project. The main objective has been to develop and validate a thermal model of a passenger car cabin. For the construction of the model, the information available in the literature has been used.

Additionally, the most interesting studies have been defined to demonstrate the capabilities of the model. Such studies have been carried out by varying certain boundary conditions, to determine its effect on the thermal conditions of the cabin.

In the present project, the process followed to model and validate the model, as well as to carry out the three main studies from it, is detailed.

The modelling and validation tool that has been used throughout the project has been Matlab.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG:

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2. | OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO | 12 |
| 2.1 | OBJETIVO PRINCIPAL | 12 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 2.3 | METODOLOGÍA | 12 |
| 3. | GESTIÓN TÉRMICA DE LA CABINA DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO | 13 |
| 3.1 | EL VEHÍCULO HÍBRIDO | 13 |
| 3.2 | MODELADO TÉRMICO DE LOS COMPONENTES DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO | 13 |
| 3.2.1 | MODELADO TÉRMICO DEL BLOQUE TÉRMICO | 14 |
| 3.2.2 | MODELADO TÉRMICO DEL BLOQUE ELÉCTRICO | 16 |
| 3.3 | LA CABINA | 18 |
| 3.4 | EL SISTEMA HVAC | 20 |
| 4. | MODELADO TÉRMICO DE LA CABINA DEL VEHÍCULO | 22 |
| 4.1 | CONFIGURACIÓN DE LA CABINA | 22 |
| 4.1.1 | LA BASE | 22 |
| 4.1.2 | LAS VENTANAS | 23 |
| 4.1.3 | EL TECHO | 24 |
| 4.1.4 | EL AIRE INTERIOR | 25 |
| 4.2 | TRANSMISIÓN DE CALOR EN LA CABINA | 26 |
| 4.2.1 | TRANSMISIÓN DE CALOR EN LA BASE | 27 |
| 4.2.2 | TRANSMISIÓN DE CALOR EN LAS VENTANAS | 28 |
| 4.2.3 | TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL TECHO | 29 |
| 4.2.4 | TRANSMISIÓN DE CALOR DE LOS HUMANOS | 30 |
| 4.3 | ENTRADAS DEL MODELO | 31 |
| 4.4 | SALIDAS DEL MODELO | 33 |
| 4.5 | TEST A VALIDAR | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.5.1 | TEST 1: VEHÍCULO PARADO | 34 |
| 4.5.2 | TEST 2: VEHÍCULO EN MOVIMIENTO | 35 |
| 5. | RESULTADOS..... | 38 |
| 5.1 | RESULTADOS TEST 1 | 38 |
| 5.2 | RESULTADOS TEST 2 | 42 |
| 5.3 | ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DEL NÚMERO DE OCUPANTES | 47 |
| 5.3.1 | RESULTADOS..... | 47 |
| 5.4 | ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DEL LUGAR GEOGRÁFICO: LEÓN | 48 |
| 5.4.1 | RESULTADOS PARA TEST 1..... | 49 |
| 5.4.2 | RESULTADOS PARA TEST 2..... | 51 |
| 5.5 | ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DEL LUGAR GEOGRÁFICO: MARRAKECH | 52 |
| 5.5.1 | RESULTADOS PARA TEST 1..... | 53 |
| 5.5.2 | RESULTADOS PARA TEST 2..... | 55 |
| 6. | CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO | 59 |
| 6.1 | CONCLUSIONES | 59 |
| 6.2 | DESARROLLO FUTURO | 59 |
| 7. | REFERENCIAS | 60 |

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

| | | |
|----|------------------|----|
| 1. | PRESUPUESTO..... | 62 |
|----|------------------|----|

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Crecimiento del mercado de vehículos eléctricos mundial. Fuente: Ref. 3..... | 11 |
| Figura 2. | Esquema de la metodología seguida en el TFG..... | 12 |
| Figura 3. | Esquema de los componentes de ambos bloques del vehículo híbrido. Fuente: Toyota 2017..... | 14 |
| Figura 4. | Radiador de un Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA). Fuente: Citroën | 15 |
| Figura 5. | Intercambiador de aceite de un MCIA. Fuente: Citroën | 15 |
| Figura 6. | Turbocompresor de un MCIA. Fuente: Citroën..... | 16 |
| Figura 7. | Motor eléctrico. Fuente: Ref. 11 | 17 |
| Figura 8. | Inversor. Fuente: Nissan..... | 17 |
| Figura 9. | Baterías. Fuente: Ref. 12. | 18 |
| Figura 10. | Esquema de la gestión térmica de la cabina integrada en un vehículo híbrido. Fuente: Ref. 4 | 18 |

| | |
|--|----|
| Figura 11. Cabina de un vehículo. Fuente: Audi..... | 19 |
| Figura 12. Simplificación geométrica de cabina con sus 3 elementos principales | 20 |
| Figura 13. Compresor eléctrico. Fuente: Toyota..... | 20 |
| Figura 14. Sistema HVAC integrado en un vehículo híbrido. Fuente: Ref. 7..... | 21 |
| Figura 15. Componentes del subsistema de enfriamiento en un vehículo híbrido. Fuente: Ref. 5. 21 | |
| Figura 16. Dibujo de la base | 22 |
| Figura 17. Dibujo de las ventanas del modelo. | 23 |
| Figura 18. Dibujo del techo del modelo | 24 |
| Figura 19. Ensamblaje de los tres componentes que conforman el modelo de la cabina..... | 26 |
| Figura 20. Dibujo esquemático de los flujos de calor en la cabina | 27 |
| Figura 21. Esquema del flujo de calor de la base al aire interior | 28 |
| Figura 22. Esquema flujo de calores sobre el parabrisas..... | 28 |
| Figura 23. Esquema flujo de calores sobre el techo..... | 30 |
| Figura 24. Esquema de las condiciones de contorno, datos de materiales y fluidos y salidas del modelo | 33 |
| Figura 25. Irradiancia incidente sobre el vehículo para el test 1 | 34 |
| Figura 26. Evolución de la temperatura exterior para el test 1 | 35 |
| Figura 27. Evolución de la velocidad para el test 2 | 35 |
| Figura 28. Evolución de la irradiancia para el test 2 | 36 |
| Figura 29. Evolución de la temperatura exterior para el test 2 | 37 |
| Figura 30. Gráfico de la temperatura de la cabina del modelo CMT junto con la referencia (Test 1) | 38 |
| Figura 31. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina (Test 1). | 39 |
| Figura 32. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 1)..... | 40 |
| Figura 33. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 1)..... | 40 |
| Figura 34. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 1)..... | 41 |
| Figura 35. Gráfico de la evolución de las temperaturas de la base, interior de la cabina y exterior..... | 42 |
| Figura 36. Gráfico de la temperatura de la cabina del modelo CMT junto con el modelo del artículo (Test 2)..... | 43 |
| Figura 37. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina (Test 2) | 43 |
| Figura 38. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 2)..... | 45 |
| Figura 39. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 2)..... | 45 |
| Figura 40. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 2)..... | 46 |
| Figura 41. Gráfico con las temperaturas de la base, interior de la cabina y exterior | 46 |
| Figura 42. Gráfico de la evolución de la temperatura del aire de la cabina para 1 y 5 ocupantes (Estudio ocupantes) | 47 |
| Figura 43. Gráfico de los flujos de calor de los elementos de la cabina hacia el interior de la misma con 5 ocupantes (Estudio ocupantes)..... | 48 |
| Figura 44. Gráfico de la evolución de la irradiancia global en León para un día típico de junio. Fuente: ref. 4..... | 49 |
| Figura 45. Gráfico de la evolución de la temperatura ambiente de León para un día típico de junio. Fuente: ref. 5..... | 49 |
| Figura 46. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de León (Test 1)..... | 50 |
| Figura 47. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de León (Test 1)..... | 50 |
| Figura 48. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de León (Test 2)..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 49. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de León (Test 2)..... | 52 |
| Figura 50. Gráfico de la evolución de la irradiancia global en Marrakech para un día típico de junio. Fuente: ref. 4..... | 53 |
| Figura 51. Gráfico de la evolución de la temperatura ambiente de Marrakech para un día típico de junio. Fuente: ref. 5..... | 53 |
| Figura 52. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de Marrakech (Test 1) | 54 |
| Figura 53. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de Marrakech (Test 1)..... | 54 |
| Figura 54. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de Marrakech (Test 2) | 55 |
| Figura 55. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de Marrakech (Test 2)..... | 56 |
| Figura 56. Gráfica de la comparación de las temperaturas del aire de la cabina para ambos estudios (Test 1)..... | 57 |
| Figura 57. Gráfica de la comparación de las temperaturas del aire de la cabina para ambos estudios (Test 2)..... | 57 |



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

DOCUMENTO 1: MEMORIA

Autor: Alejandro Vega Álvarez

Tutor: Pablo César Olmeda González

Valencia, junio de 2021

1. INTRODUCCIÓN

La gestión energética en los vehículos siempre se ha considerado un factor muy importante a estudiar, sobre todo en los vehículos híbridos o eléctricos, donde se han de tener en cuenta diversas fuentes y cargas energéticas.

Dentro de dicha gestión térmica, es importante resaltar la relevancia del sistema de aire acondicionado, puesto que todos los vehículos, independientemente del tipo de motor, tamaño, etc. contienen algún tipo de sistema de refrigeración y ventilación para asegurar el confort de los usuarios.

En los últimos años, la política internacional en cuanto a la regulación de la contaminación producida por los vehículos se ha ido haciendo cada vez más estricta. De este modo, la mejora de la eficiencia que repercute en una reducción de las emisiones contaminantes se ha vuelto de vital importancia.

Para conseguir una considerable reducción de consumo de combustible y, por tanto, una menor emisión de gases contaminantes, el estudio de la gestión térmica en vehículos híbridos y totalmente eléctricos para mejorar su eficiencia es fundamental. Sin embargo, la complejidad de los vehículos electrificados hace necesario el estudio a nivel de sistema, en lugar de a nivel de componente, para poder conseguir una mejora de la eficiencia global del vehículo.

Este Trabajo Final de Grado forma parte de un proyecto basado en el desarrollo de una planta de simulación virtual de vehículos electrificados, con el objetivo de disminuir los tiempos de desarrollo de los nuevos vehículos. Concretamente, el sistema estudiado, modelado y validado en este proyecto es el modelo de una cabina de un vehículo híbrido, aunque sería válido para cualquier otro vehículo.

En la Figura 1 se puede observar el crecimiento del mercado de vehículos eléctricos, así como la previsión para los próximos años. Como se puede comprobar, se trata de un crecimiento acusado, que se espera que llegue a unos 20 millones de vehículos desde 2016 a 2030.

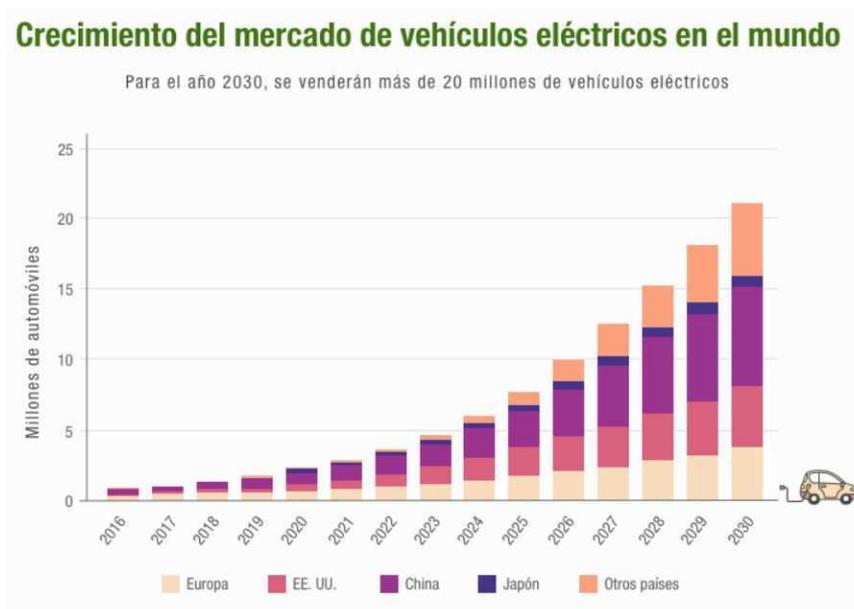


Figura 1. Crecimiento del mercado de vehículos eléctricos mundial. Fuente: Ref. 3

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un modelo de cabina que será necesario para su posterior integración en una plataforma de simulación virtual de un vehículo híbrido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir del objetivo general de este Trabajo Final de Grado, descrito en el apartado 2.1, se pueden extraer otros objetivos parciales. Estos objetivos específicos se pueden dividir en dos grandes partes diferenciadas:

- Diseñar, programar, ajustar y validar el modelo térmico de la cabina del vehículo híbrido
- Realizar diferentes estudios paramétricos usando el modelo térmico de la cabina validado.

En definitiva, este proyecto consiste en desarrollar e implementar un modelo numérico que calcule los flujos térmicos en la cabina de un vehículo híbrido.

2.3 METODOLOGÍA

La metodología seguida para realizar este trabajo es la siguiente:

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de identificar la manera adecuada de modelar la cabina de acuerdo a las necesidades del proyecto.

Posteriormente, se tomaron los datos de la literatura encontrada [ref. 1] para poder disponer de datos experimentales que sirvieran para la validación del modelo desarrollado. Para la construcción del modelo se utilizó el software de cálculo numérico Matlab. Una vez implementado el modelo en la herramienta se procedió a realizar simulaciones para validar el mismo.

Finalmente, se realizaron diversos estudios para analizar la sensibilidad del modelo a la variación de la condiciones de contorno.

En la Figura 2, se puede ver un esquema de la metodología seguida:

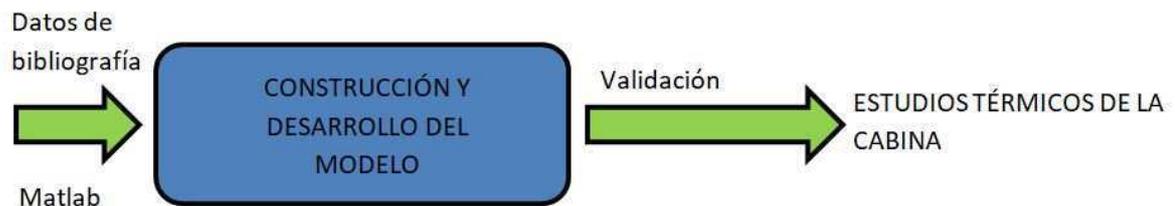


Figura 2. Esquema de la metodología seguida en el TFG

3. GESTIÓN TÉRMICA DE LA CABINA DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO

3.1 EL VEHÍCULO HÍBRIDO

Como se verá en los sucesivos apartados del Trabajo Final de Grado, el vehículo que se ha utilizado para realizar el modelo es un vehículo híbrido.

En primer lugar, un vehículo híbrido es aquel que utiliza dos motores totalmente distintos para su correcto movimiento: un motor convencional de combustión interna (MCIA) y un motor eléctrico. De esta forma, el vehículo utiliza de forma alterna ambos motores mientras circula, pudiendo propulsarse sólo con el motor eléctrico (normalmente en el arranque, o a bajas velocidades), sólo con el MCIA (y usar el mismo para cargar las baterías), o con el motor eléctrico y de combustión interna funcionando simultáneamente. El objetivo fundamental de esta tecnología es permitir al usuario realizar sus trayectos de forma más eficiente y limpia, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones.

Una gran cantidad de estudios han sido realizados sobre estos tipos de vehículos [ref. 2]. Para identificar las necesidades del modelo de cabina (objeto de estudio en este TFG) desde un punto de vista integral, es muy importante conocer el resto de componentes del vehículo híbrido, además de estudiar posibles sinergias entre los diferentes elementos del sistema.

3.2 MODELADO TÉRMICO DE LOS COMPONENTES DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO

En primer lugar, es imprescindible conocer los requisitos térmicos y los sistemas de gestión térmica de los componentes para poder estudiar su posible integración con el modelo de la cabina.

Los vehículos híbridos contienen dos bloques principales: el bloque térmico y el bloque eléctrico. Ambos bloques combinan su funcionamiento para garantizar la óptima propulsión del automóvil.

El **bloque térmico** es el que contiene el motor de combustión interna (MCIA) convencional, y todos los elementos necesarios para que éste funcione correctamente. Normalmente se trata de un motor de encendido provocado (MEP) o de encendido por compresión (MEC). Los combustibles habituales usados en estos motores son gasolina y diésel, aunque también pueden ser gas o biocombustibles.

El **bloque eléctrico** se compone de una máquina eléctrica (motor eléctrico y generador), una batería y una serie de elementos de electrónica de potencia (inversor, convertidor, sistemas de gestión de la batería...).

Existen varias maneras de funcionamiento de un vehículo híbrido:

- Éste puede ser enchufable (las baterías se pueden cargar conectándolas a la red eléctrica) o auto recargable (se carga la batería durante el frenado).
- Además, la configuración del vehículo híbrido puede ser en serie o en paralelo. Las baterías pueden mover el motor eléctrico o ser cargadas con el generador con el MCIA, o durante la frenada.

- La propulsión del vehículo puede ser totalmente eléctrica, utilizando el motor de combustión interna alternativo para cargar la batería (configuración en serie); ésta puede ser térmica, utilizando el MCI para mover las ruedas y cargar la batería (configuración en paralelo), o simultáneamente la batería y el motor eléctrico se pueden encargar de mover las ruedas.

En la Figura 3, se puede observar un esquema de los componentes de ambos bloques, entre ellos el motor térmico (parte térmica) y el motor eléctrico y generador, batería, inversor... (Parte eléctrica).

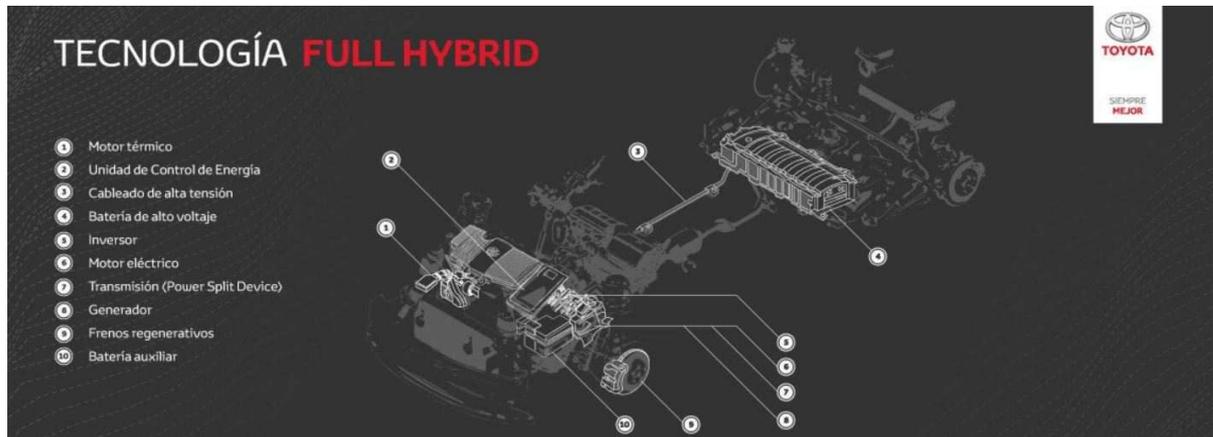


Figura 3. Esquema de los componentes de ambos bloques del vehículo híbrido. Fuente: Toyota 2017

3.2.1 MODELADO TÉRMICO DEL BLOQUE TÉRMICO

La gestión térmica de los diferentes componentes es necesaria para garantizar el buen funcionamiento de los materiales que contienen. Es decir, para mantener la eficiencia del vehículo en niveles altos y para garantizar la seguridad y protección de los materiales que forman dichos componentes, es de vital importancia que la temperatura de los mismos se mantenga dentro de un rango óptimo.

Dentro del modelado térmico de las distintas partes que conforman el bloque térmico del vehículo, es importante fijarse en el propio motor de combustión interna alternativo (MCI). A continuación, se destacan aquellos elementos donde ocurren importantes intercambios de calor y, por lo tanto, son objeto de modelado térmico:

- **Motor térmico.** Como ya se ha descrito antes, se trata de un MCI, en el que se quema un combustible (normalmente diésel o gasolina). Evidentemente, al quemar dicho combustible, se generará una cantidad de calor muy grande, que necesitará ser evacuado.
- **Radiador.** En el circuito refrigerante del motor, el líquido refrigerante se calienta a su paso por los componentes de la cámara de combustión del motor (pistón, culata y cilindro). Más adelante, el calor absorbido por el líquido refrigerante se cederá al ambiente a través del radiador, con ayuda de un ventilador. Aquí, existe una importante transferencia de calor entre los componentes de la cámara de combustión y el líquido refrigerante. Ocurre exactamente lo mismo entre el líquido refrigerante y el ambiente, en el propio radiador, para disipar el calor absorbido por el líquido refrigerante.



Figura 4. Radiador de un Motor de Combustión Interna Alternativo (MCI). Fuente: Citroën

- **Intercambiador de aceite.** Mediante un intercambiador o enfriador aceite-refrigerante, el aceite caliente proveniente del motor se enfría por transferencia de calor al propio líquido refrigerante.



Figura 5. Intercambiador de aceite de un MCI. Fuente: Citroën

- **Turbocompresor.** El turbocompresor también utiliza el propio aceite de la lubricación del motor para evitar las altas temperaturas alcanzadas por el mismo. Existe, por tanto, una importante transferencia de calor del turbocompresor al aceite, y del aceite al refrigerante en el intercambiador de aceite. En ocasiones, los turbocompresores se refrigeran también con el propio refrigerante del motor. En ambos casos (refrigeración del turbocompresor con aceite o con aceite y refrigerante), de una forma u otra, el calor llega al fluido refrigerante.



Figura 6. Turbocompresor de un MCI. Fuente: Citroën

3.2.2 MODELADO TÉRMICO DEL BLOQUE ELÉCTRICO

Del mismo modo que en el bloque térmico, la gestión térmica en el bloque eléctrico es de relevante importancia. De hecho, a modo de ejemplo, el rango de trabajo óptimo de las baterías de los vehículos híbridos o eléctricos se debe mantener entre 15°C y 35°C, lo cual es importante, ya que las temperaturas de la cabina suelen estar también comprendidas dentro de este rango.

En el bloque eléctrico, la gestión del calor generado adquiere una gran relevancia en sus tres componentes principales: el motor eléctrico, el inversor de corriente y las baterías. A continuación, se explican dichas generaciones y transferencias de calor en los puntos más importantes del bloque:

- **El motor eléctrico.** Se trata del elemento que transforma la energía eléctrica almacenada en las baterías en energía cinética. Las principales fuentes de generación de calor en el motor eléctrico se producen por el denominado *efecto Joule* en los devanados y las pérdidas en el hierro. Las pérdidas magnéticas (en caso de tener un rotor con imán permanente) y por fricción son menos significativas. Para disipar dicho calor, se utiliza un líquido refrigerante, como ocurre en los motores de combustión interna alternativos.



Figura 7. Motor eléctrico. Fuente: Ref. 11

- **El inversor.** Se trata del elemento encargado de variar de corriente continua a alterna, haciendo de conexión entre la batería y la máquina eléctrica (motor eléctrico y generador). En este caso, las pérdidas de calor más significativas son por conducción y *switching* (apertura y cierre) de diodos y transistores.



Figura 8. Inversor. Fuente: Nissan

- **Las baterías.** Como ya se ha visto anteriormente, las baterías son las encargadas de almacenar la energía que luego será usada por el motor eléctrico. Se trata de elementos que requieren unas temperaturas de funcionamiento concretas (su rango de funcionamiento óptimo es entre 15°C y 35°C) Temperaturas más altas podrían causar un indeseable sobrecalentamiento de las mismas y reducir su vida útil, pudiendo provocar incluso un incendio. Por el contrario, temperaturas demasiado bajas pueden reducir drásticamente la capacidad de las baterías. Por tanto, para asegurar el buen funcionamiento del conjunto de componentes es crucial que exista una adecuada disipación del calor generado mediante un líquido refrigerante.

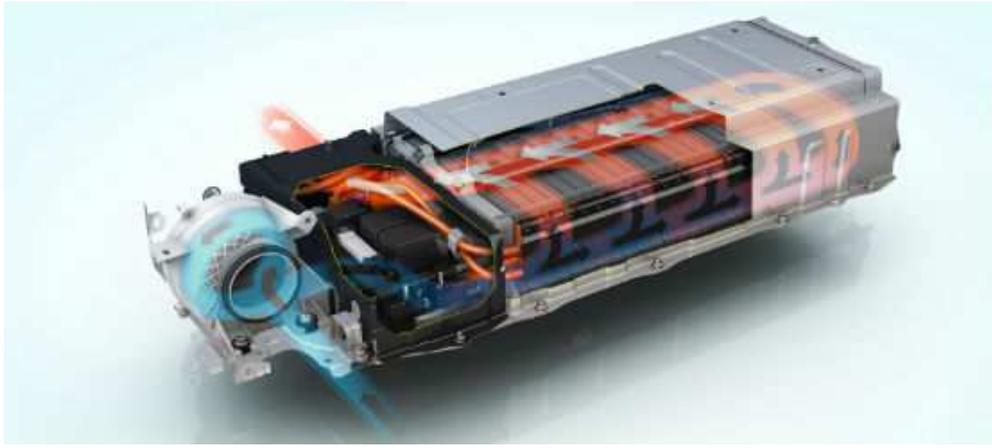


Figura 9. Baterías. Fuente: Ref. 12.

3.3 LA CABINA

Este Trabajo Final de Grado se centra, concretamente, en la cabina del vehículo híbrido. Como ya se ha visto anteriormente, la gestión térmica de las diferentes partes de los bloques térmicos y eléctricos del vehículo es muy importante, y por ello surge la necesidad de hacer modelos para simular su comportamiento a nivel térmico y de transferencia de calor. Sin embargo, la gestión térmica de la cabina no es menos importante, ya que es vital para la sensación de confort del usuario.

En la Figura 10, se muestra un esquema de la gestión térmica de la cabina integrada en un vehículo híbrido. Cabe destacar que la integración de la cabina con el resto de componentes del vehículo es de vital importancia para aprovechar posibles sinergias y tener una mayor eficiencia energética.

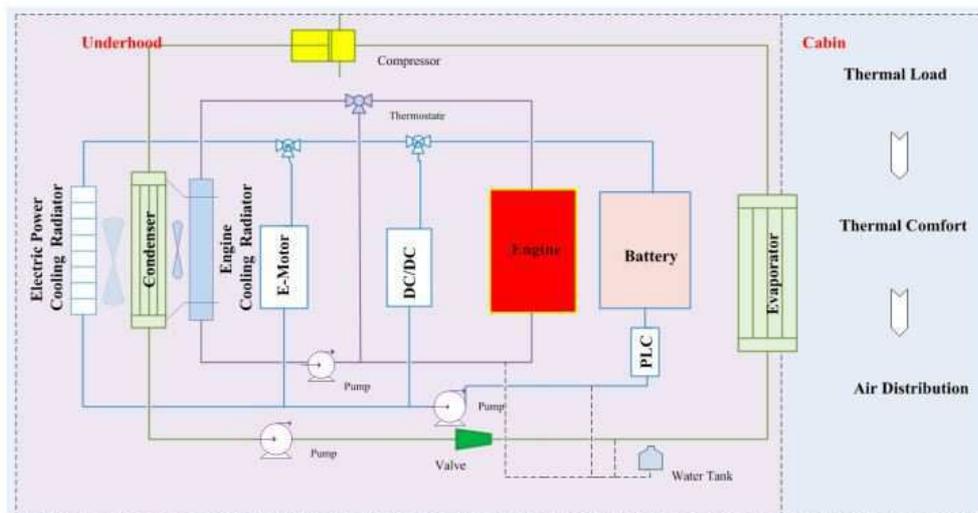


Figura 10. Esquema de la gestión térmica de la cabina integrada en un vehículo híbrido. Fuente: Ref. 4

A nivel tecnológico, es crucial que todos los componentes del vehículo trabajen a una temperatura tal que se garantice su correcto funcionamiento y la adecuada propulsión del automóvil. No

obstante, a nivel de comodidad y ergonomía para el usuario, mantener una temperatura dentro de la cabina también es de gran relevancia.



Figura 11. Cabina de un vehículo. Fuente: Audi

La temperatura de la cabina del vehículo depende de múltiples factores. Estos factores pueden ser **externos** (o, lo que es lo mismo, condiciones de contorno), o **intrínsecos** al propio vehículo o al aire que se encuentra dentro del mismo. Por ejemplo, como factores externos se encuentran la temperatura exterior, la irradiancia solar, la velocidad del vehículo o el número de ocupantes. Como es de esperar, no se habrán tenido las mismas condiciones un día de invierno que uno de verano, ni tampoco si hay un solo ocupante o hay cuatro. Como factores internos o intrínsecos al vehículo serían de relevancia las condiciones geométricas del mismo, las propiedades térmicas de sus componentes o las propiedades del aire dentro de la cabina. No obtendremos las mismas condiciones térmicas en la cabina si se trata de un vehículo pequeño o grande, o si la carrocería es de un color u otro.

Dentro de la cabina, podemos distinguir los siguientes elementos principales, que han sido simplificados a 3:

- **Las ventanas**, que incluye el parabrisas, las ventanas laterales y la ventana de detrás.
- **El techo**, con una parte interna y otra externa.
- **La base**, que se trata de un volumen que engloba el salpicadero y los asientos del vehículo.

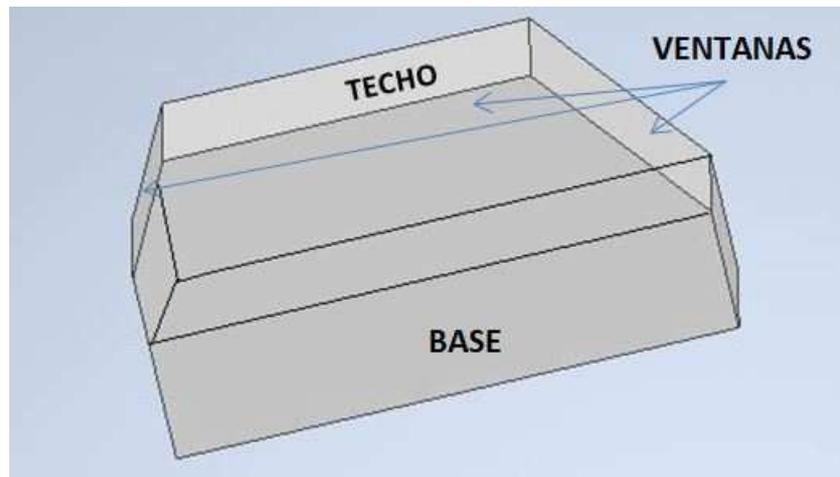


Figura 12. Simplificación geométrica de cabina con sus 3 elementos principales

Evidentemente existirán diferencias de comportamiento de unos elementos a otros, y este hecho hace que sea necesario un modelo térmico que abarque todas las relaciones y transferencias de calor entre ellos, y con las condiciones externas correspondientes.

3.4 EL SISTEMA HVAC

La interacción térmica inmediata de la cabina es con el sistema de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (**H**eating **V**entilation **A**ir **C**onditioning, HVAC), por lo que es de vital importancia conocer sus características para una correcta interacción e integración.

El objetivo en este caso es conocer qué sistema de refrigeración es necesario a partir del modelo térmico de la cabina.

Normalmente, en los vehículos híbridos, el sistema de aire acondicionado cuenta principalmente con un compresor eléctrico, un condensador, un evaporador, una válvula de expansión y un líquido refrigerante, que es el encargado de absorber calor del habitáculo.



Figura 13. Compresor eléctrico. Fuente: Toyota

En el caso de la calefacción, el modelado integral ayuda a estudiar si es mejor que se caliente la cabina usando el MCIA (como en los vehículos convencionales), o con el HVAC (que también permite calentar invirtiendo el paso del fluido refrigerante con una válvula de tres vías).

La Figura 14 muestra una imagen del sistema HVAC integrado en un vehículo híbrido, junto con los demás sistemas que lo forman, donde se ve cómo están conectados entre sí, lo cual es muy importante para poder aprovechar posibles sinergias.

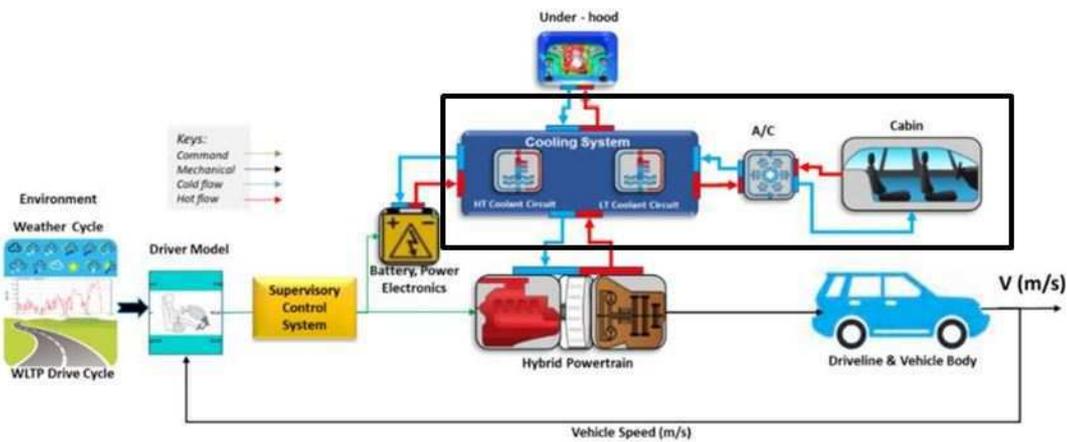


Figura 14. Sistema HVAC integrado en un vehículo híbrido. Fuente: Ref. 7

En la Figura 15, se puede observar un esquema con los componentes del subsistema de enfriamiento de un vehículo híbrido, en el que se muestra el funcionamiento de cada uno, los parámetros más relevantes y los flujos de calor involucrados.

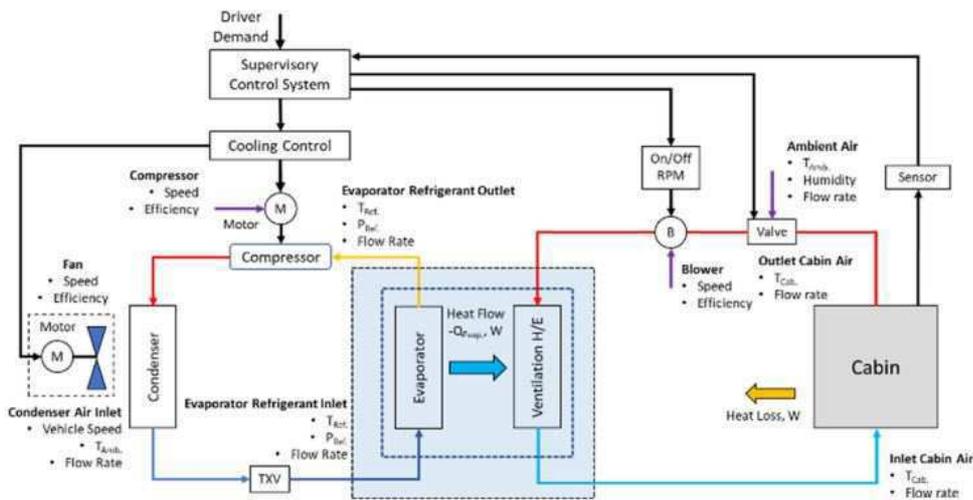


Figura 15. Componentes del subsistema de enfriamiento en un vehículo híbrido. Fuente: Ref. 5

Como se puede ver, todos los componentes del vehículo híbrido mostrados en la Figura 10 están relacionados entre sí, y también lo están con la cabina, que es el objeto de estudio de este TFG. Por tanto, conocer y tener en cuenta el comportamiento térmico de dichos componentes facilita el estudio del modelo térmico de la cabina. La cabina no es una parte aislada del vehículo, sino que el resto de componentes y sistemas del vehículo híbrido tendrán una interacción térmica con la cabina y con el sistema HVAC.

4. MODELADO TÉRMICO DE LA CABINA DEL VEHÍCULO

A continuación, se explica el modelo térmico de la cabina del vehículo híbrido que ha sido realizado en este Trabajo Final de Grado. Como ya se ha visto, ha sido realizado en su totalidad en el entorno de programación de Matlab.

Además, para la validación de dicho modelo se han utilizado los datos disponibles en la bibliografía [ref. 1].

4.1 CONFIGURACIÓN DE LA CABINA

Para comprender el modelo desarrollado, se debe conocer la geometría y composición de la propia cabina, así como las simplificaciones que se han hecho de ella para facilitar su modelado y posterior validación. Esto se puede observar en la Figura 12, donde se nombran los tres principales elementos geométricos considerados en la simplificación.

La cabina de un vehículo híbrido, al igual que los vehículos propulsados únicamente por motores MCI, contiene un gran número de elementos. Se pueden encontrar las distintas ventanas, el techo, el suelo, los asientos, el salpicadero y los elementos que en él se encuentran, como el volante, etc. Se han considerado simplificaciones para reducir el coste de programación y el tiempo de cálculo. Sin embargo, en caso de que los resultados de la validación no fueran satisfactorios, se podría ampliar el nivel de discretización. Por todo ello, para el modelo se han considerado tres componentes principales en la cabina: la base, las ventanas y el techo.

4.1.1 LA BASE

La base consiste en un volumen en forma de paralelepípedo rectangular, que incluye el salpicadero, con todos los elementos que lo conforman, los asientos y el suelo. Así pues, la misma tendrá una superficie de contacto con el aire de la cabina, que simula el aire en contacto con los elementos comprendidos en ella. Es de relevancia destacar que únicamente la base y el aire interior de la cabina tendrán inercia térmica.

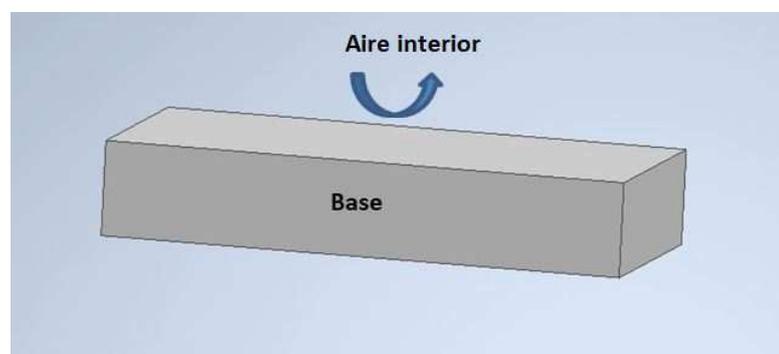


Figura 16. Dibujo de la base

Las propiedades geométricas y térmicas de la base que han sido utilizadas en el modelo se muestran en la *Tabla 1*, a continuación:

| | Área cara superior (m ²) | Reflectividad (ρ) | Absortividad (α) |
|-------------|---|--------------------------|---------------------------|
| Base | 6 | 0.3 | 0.7 |

Tabla 1. Propiedades geométricas y térmicas de la base

4.1.2 LAS VENTANAS

Con el fin de facilitar la visibilidad desde dentro del vehículo, existen varias ventanas en una cabina convencional. Las principales son el parabrisas o ventana frontal, que permite al conductor ver la carretera; la ventana trasera, que le permite ver a los vehículos que circulan detrás de él, y las cuatro ventanas laterales, dos en la parte derecha y dos en la parte izquierda. En este modelo, el conjunto de las ventanas está formado por la ventana delantera, la trasera, la derecha y la izquierda (considerando, para estos dos últimos casos, las dos ventanas de un mismo lateral como una sola).

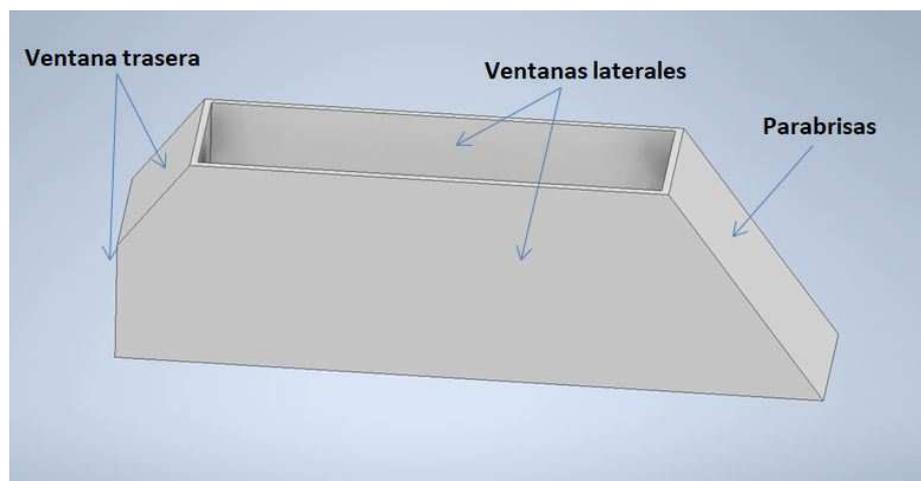


Figura 17. Dibujo de las ventanas del modelo.

En la *Tabla 2*, se muestran las propiedades geométricas de las cuatro ventanas del vehículo híbrido consideradas en el modelo:

| Ventana | Longitud (m) | Anchura (m) | Espesor (mm) |
|--------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Parabrisas | 0.63 | 1.30 | 6.0 |
| Ventana trasera | 0.29 | 1.00 | 5.0 |
| Ventana derecha | 1.45 | 0.29 | 3.0 |
| Ventana izquierda | 1.45 | 0.29 | 3.0 |

Tabla 2. Propiedades geométricas de las ventanas

En la *Tabla 3*, se muestran las propiedades térmicas (de conducción y radiación) de las cuatro ventanas consideradas:

| Ventana | Conductividad K ($\frac{W}{mK}$) | Emisividad ϵ | Reflectividad ρ | Transmisividad τ |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Parabrisas | 1.4 | 0.70 | 0.075 | 0.225 |
| Ventana trasera | 1.4 | 0.70 | 0.070 | 0.230 |
| Ventana derecha | 1.4 | 0.70 | 0.075 | 0.225 |
| Ventana izquierda | 1.4 | 0.70 | 0.075 | 0.225 |

Tabla 3. Propiedades de conductividad y radiación de las ventanas

4.1.3 EL TECHO

Como en cualquier vehículo, dentro de la cabina se encontrará también el techo. A efectos de cálculo para las distintas transferencias de calor, éste será considerado que es del mismo material que el resto de la carrocería del vehículo, acero, y que está pintado con la misma pintura. Se considerará, también, de geometría plana.

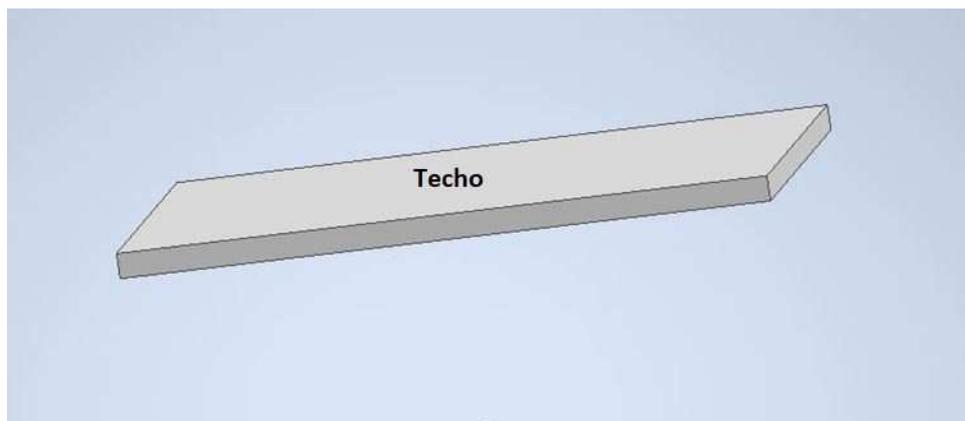


Figura 18. Dibujo del techo del modelo

A continuación, en la *Tabla 4* y la *Tabla 5*, se exponen las propiedades geométricas y térmicas del techo, respectivamente:

| | Longitud (m) | Anchura (m) | Espesor (mm) |
|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Techo | 1.80 | 1.10 | 0.5 |

Tabla 4. Propiedades geométricas del techo

| | Conductividad K ($\frac{W}{mK}$) | Emisividad ϵ | Reflectividad ρ | Transmisividad τ |
|--------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Techo | 14.9 | 0.65 | 0.35 | 0 |

Tabla 5. Propiedades térmicas del techo

Como ya ha sido mencionado, el techo, igual que el conjunto de la carrocería, está formado por una capa de acero inoxidable, recubierta de otra de pintura. Con el fin de simplificar el modelado de la cabina, se ha considerado la conductividad térmica del acero, mientras que se han tomado en cuenta las propiedades de radiación (ϵ , ρ , τ) de la pintura, que es la capa superficial. Es decir, para cada forma de transmisión de calor, se han tenido en cuenta los materiales más relevantes que en ella estén involucrados.

4.1.4 EL AIRE INTERIOR

El volumen que queda confinado entre la base, las ventanas y el techo es el **aire interior de la cabina**, que es el pilar central de todo el modelo, ya que es fundamental analizar las variaciones térmicas que puedan producirse en dicho volumen, pues determinan el nivel de confort de los pasajeros y las condiciones de trabajo del HVAC. En la *Tabla 6*, se muestran las propiedades geométricas de la cabina, y en la *Tabla 7*, las propiedades termofísicas del aire interior que han sido utilizadas para el modelo:

| Geometría de la cabina | Altura (m) | Anchura (m) | Longitud lado inferior (m) | Longitud lado superior (m) | Volumen total (m^3) |
|------------------------|------------|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | 0.546 | 1.10 | 1.80 | 1.45 | 1.95 |

Tabla 6. Características geométricas de la cabina

| Propiedades aire interior | Densidad ($\frac{kg}{m^3}$) | Calor específico, Cp ($\frac{J}{kgK}$) |
|---------------------------|-------------------------------|--|
| | 1.18 | 1006 |

Tabla 7. Propiedades termofísicas del aire interior

Por tanto, ya han quedado expuestos los componentes principales de la cabina a modelar (incluyendo el propio aire interior) y sus propiedades geométricas y térmicas, que jugarán un papel muy importante en el modelado.

A continuación, se muestra una imagen del ensamblaje de todas las partes que conforman el modelo de cabina (Figura 19).

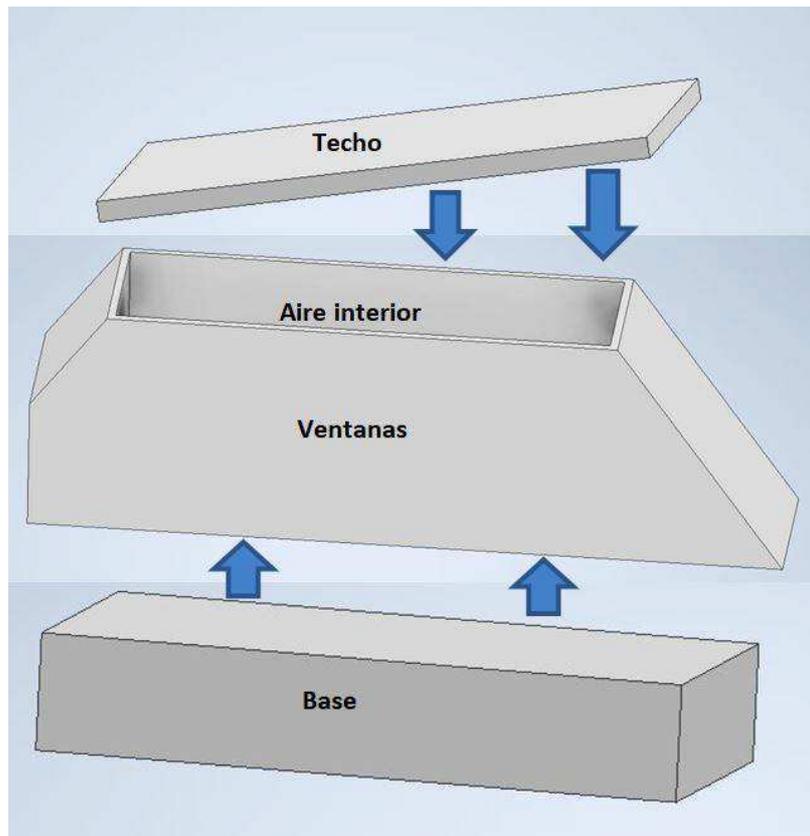


Figura 19. Ensamblaje de los tres componentes que conforman el modelo de la cabina

4.2 TRANSMISIÓN DE CALOR EN LA CABINA

Una vez han sido expuestos los principales elementos que forman parte del modelo, así como su geometría y sus propiedades térmicas, es importante conocer qué papel juega cada uno de dichos elementos en la transmisión de calor de la cabina, es decir, cómo influyen en la transferencia de calor entre el exterior y el interior de la cabina del vehículo.

Cabe destacar que la transferencia de calor entre el exterior y el interior del habitáculo ocurrirá a través de la base, de las ventanas y del techo. Además, habrá una generación de calor interna, que serán los ocupantes que haya dentro del vehículo. Sin duda, es necesario estudiar la aportación de cada elemento a los flujos de calor de la cabina por separado.

En la Figura 20, se muestra una imagen con los flujos de calor principales en la cabina:

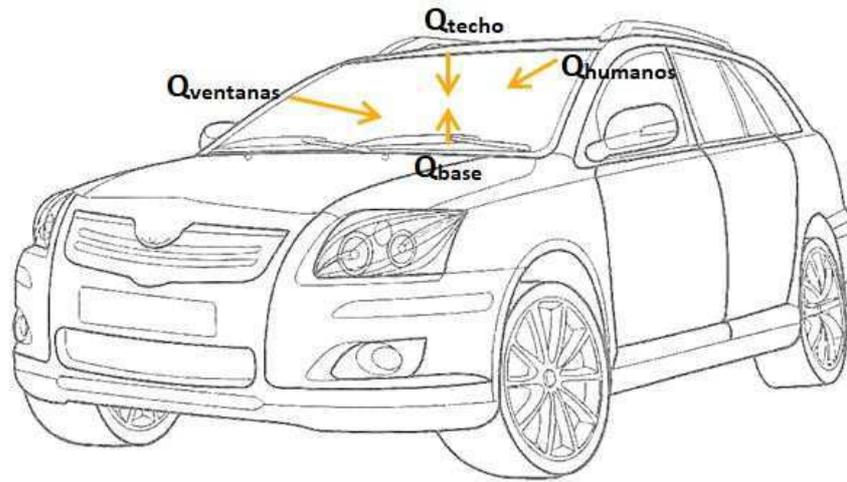


Figura 20. Dibujo esquemático de los flujos de calor en la cabina

4.2.1 TRANSMISIÓN DE CALOR EN LA BASE

Se denomina Q_{base} al flujo de calor intercambiado entre la base y el aire interior de la cabina. Esta transferencia de calor se realiza por convección natural. El fondo de la base se considera adiabático, y es la propia base la que recibe la radiación solar (irradiancia) incidente que se transmite a través de las ventanas. Esto significa que sólo puede recibir radiación transmitida a través de las ventanas (en su totalidad), y sólo puede haber transferencia de calor entre la cara superior de la base y el aire de la cabina (en el apartado 4.2.2 se explicará con mayor detalle).

El flujo de calor de la base al aire interior, al tratarse de convección, dependerá del **coeficiente de convección** (h_{base}), que será calculado en el modelo para convección natural; del **área** de contacto entre la base y el aire interior (A_{base}), cuyo valor ha quedado reflejado en el apartado 4.1.1, y del **salto térmico** entre la base y el aire interior ($T_{base} - T_{air}$). Así pues, el término Q_{base} quedará determinado por la ecuación 1:

$$Q_{base} = A_{base}h_{base}(T_{base} - T_{air}) \quad (1)$$

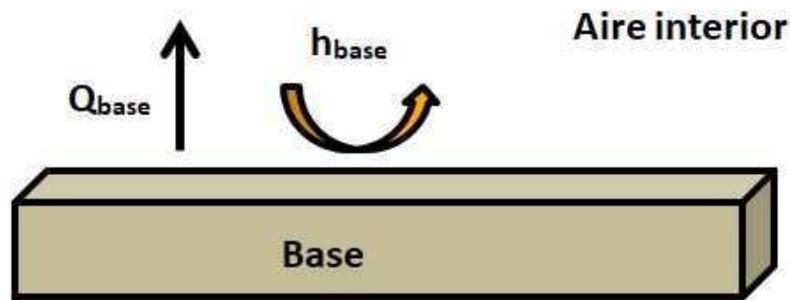


Figura 21. Esquema del flujo de calor de la base al aire interior

Para poder aplicar la ecuación (1), primero es necesario saber de qué parámetros dependerá la propia temperatura de la base (T_{base}):

1. La inercia térmica (C_{base}) o, lo que es lo mismo, capacidad térmica por masa.
2. La absorptividad, α .
3. Las áreas de las cuatro ventanas y las irradiancias transmitidas a través de ellas.

4.2.2 TRANSMISIÓN DE CALOR EN LAS VENTANAS

Se denomina $Q_{ventanas}$ a la suma de los flujos de calor que llegan a la cabina a través de las cuatro ventanas consideradas en el modelo ($Q_{par} + Q_{vent. trasera} + Q_{vent. derecha} + Q_{vent. izquierda}$). En la figura 22, se puede observar Q_{par} para el parabrisas. Los demás flujos de calores serían análogos para el resto de ventanas. Del mismo modo que ocurriría con la base, estos calores se transmitirán de las ventanas al aire interior del vehículo por convección natural.

En primer lugar, es importante analizar lo que ocurre, a nivel térmico, en cada ventana. Se considerará, a modo de ejemplo, el parabrisas, aunque la situación en el resto de las ventanas será análoga.

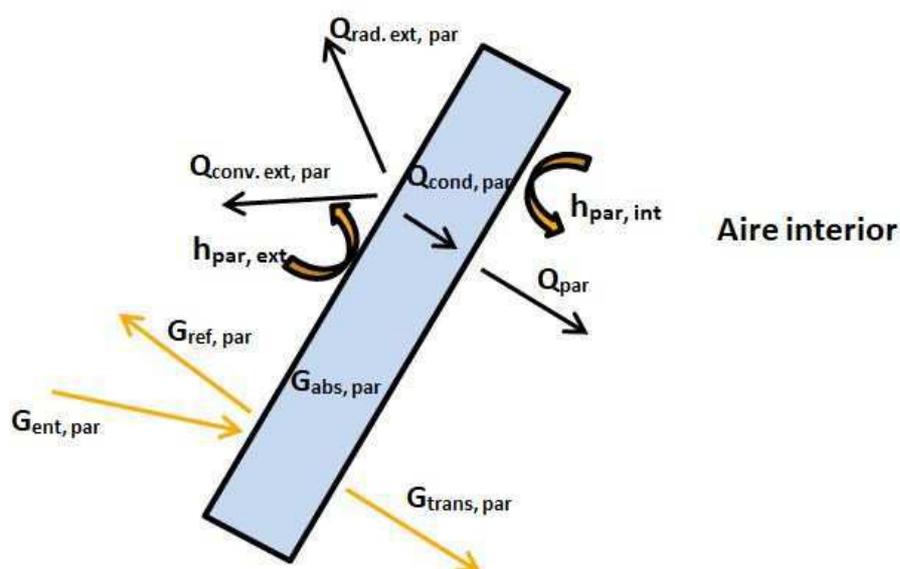


Figura 22. Esquema flujo de calores sobre el parabrisas

Por un lado, existe una irradiancia solar entrante, que incide sobre la ventana (G_{ent}). Dicha irradiancia se descompone en tres partes: una parte que absorbe el cristal (G_{abs}), otra que se transmite hacia dentro de la cabina, concretamente a la base (G_{trans}), y otra que se refleja (G_{ref}). Además, en la propia ventana existe un flujo de calor por conducción (Q_{cond}), que va de la parte exterior de la ventana a la interior; otro por convección con el exterior ($Q_{conv. ext}$), que será natural o forzada según sea la velocidad del vehículo, y otro por radiación de la ventana al ambiente ($Q_{rad. exterior}$).

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del calor transferido a la cabina desde las ventanas son:

$$Q_{par} = A_{par}h_{par}(T_{par} - T_{air}) \quad (2)$$

$$Q_{vent. trasera} = A_{vent. trasera}h_{vent. trasera}(T_{vent. trasera} - T_{air}) \quad (3)$$

$$Q_{vent. derecha} = A_{vent. derecha}h_{vent. derecha}(T_{vent. derecha} - T_{air}) \quad (4)$$

$$Q_{vent. izquierda} = A_{vent. izquierda}h_{vent. izquierda}(T_{vent. izquierda} - T_{air}) \quad (5)$$

Donde Q_{par} , $Q_{vent. trasera}$, $Q_{vent. derecha}$ y $Q_{vent. izquierda}$ son el calor transferido a la cabina desde el parabrisas (o ventana frontal), la ventana trasera, la ventana derecha y la ventana izquierda, respectivamente.

Por último, haciendo referencia al comienzo de este apartado, el calor aportado a la cabina del vehículo por las ventanas vendrá dado por:

$$Q_{ventanas} = Q_{par} + Q_{vent. trasera} + Q_{vent. derecha} + Q_{vent. izquierda} \quad (6)$$

4.2.3 TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL TECHO

Se llama Q_{techo} al flujo de calor intercambiado entre el techo y el aire interior de la cabina. Como ocurría con la base y las ventanas, dicho flujo de calor se transmitirá por convección natural. Por tanto, este calor por convección dependerá del coeficiente de convección interior del techo ($h_{techo, int}$), del área del techo (A_{techo}) y del salto térmico entre el techo y el aire de la cabina ($T_{techo, int} - T_{air}$). A continuación, se observa la ecuación que muestra esta situación:

$$Q_{techo} = A_{techo}h_{techo, int}(T_{techo, int} - T_{air}) \quad (7)$$

A continuación, en la Figura 23, se muestra un esquema del flujo de calores que hay sobre el techo:

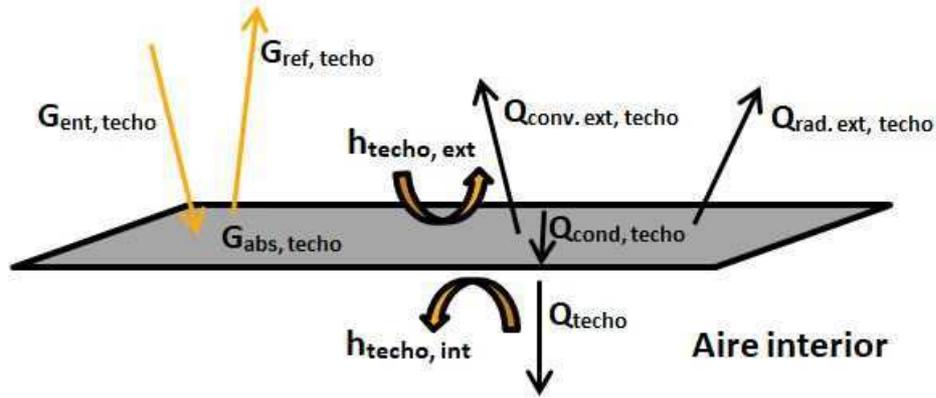


Figura 23. Esquema flujo de calores sobre el techo

Como se puede observar en la imagen anterior, a diferencia de las ventanas, se considera que la pintura del techo tiene una transmisividad (τ) de 0. Es decir, toda la irradiancia incidente (G_{ent}) sobre el mismo será o bien reflejada (G_{ref}), o bien absorbida (G_{abs}). Además, en el techo existe un flujo de calor por conducción (Q_{cond}), que va de la parte exterior del techo a la interior; otro por convección con el exterior ($Q_{conv. ext}$), que será natural o forzada según sea la velocidad del vehículo, y otro por radiación del techo al ambiente ($Q_{rad. exterior}$). A continuación, se muestra la ecuación del balance de calores en el techo:

$$Q_{conv. ext} + Q_{rad. exterior} = Q_{cond} + \alpha_{techo} A_{techo} G_{ent} \quad (8)$$

4.2.4 TRANSMISIÓN DE CALOR DE LOS HUMANOS

Por último, para realizar un modelo térmico de una cabina donde podrían viajar, dependiendo del vehículo, varias personas, es muy importante analizar el calor (no despreciable) que éstas generan en su interior. La evolución de la temperatura del aire interior de la cabina no será la misma sin ocupantes en su interior, que si en el interior hay varias personas. Para ello, se utiliza el término $Q_{humanos}$, que expresa el calor total generado por todos los ocupantes del vehículo.

Dicho calor se tomará como una generación en el interior de la cabina, y su valor viene dado según la norma UNE-EN ISO 7730, que establece que una persona adulta que realiza una actividad ligera sentada (entre las cuales se encuentra estar sentado dentro de un vehículo) desprende 120W. Por lo tanto, se tomará la ecuación 9:

$$Q_{humanos} = 120n \quad (9)$$

Donde n es el número de ocupantes del vehículo. Es decir, se asumirá que todos los ocupantes generan el mismo calor y, por tanto, el calor total generado será 120 veces el de cada persona.

Una vez han sido analizadas las aportaciones de todos los componentes al modelo térmico, el último paso es realizar el sumatorio de dichas aportaciones. Para poder estudiar cómo afectan a la

temperatura de la cabina, se realiza el balance energético del aire interior de la cabina de acuerdo a la ecuación 10:

$$m_{\text{air}} C_{p\text{air}} \frac{dT_{\text{air}}}{dt} = Q_{\text{base}} + Q_{\text{techo}} + Q_{\text{ventanas}} + Q_{\text{humanos}} \quad (10)$$

Como se puede comprobar, la evolución de la temperatura del aire de la cabina con el tiempo depende de los cuatro flujos de calor ya analizados, así como de la masa del aire en la cabina (calculada a partir de su densidad y el volumen de la cabina) y de su calor específico.

Esta expresión es el pilar principal de todo el modelo, y alrededor de ella se itera para conseguir la evolución de la temperatura del aire interior del vehículo.

4.3 ENTRADAS DEL MODELO

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo estará muy condicionado por las condiciones de contorno y los datos geométricos y termofísicos de los materiales y fluidos. Se han considerado las condiciones de contorno como aquellas entradas que se pueden y, de hecho, se modifican de un ensayo a otro. Por otro lado, se tienen las propiedades geométricas y termofísicas de los distintos elementos de la cabina y las propiedades del aire que no van a variar en ningún momento (todas ya expuestas en el apartado 4.1).

A continuación, se exponen todas las entradas consideradas en la realización de este modelo:

- **Irradiancia** sobre las ventanas y el techo. Es evidente que el calor transmitido hacia la cabina por las ventanas y el techo variará según varíe la irradiancia incidente sobre ellos. De hecho, la evolución de la irradiancia a lo largo de la simulación es distinta para cada uno de los ensayos (test) realizados.
- **Temperatura exterior.** La evolución de la temperatura exterior en un determinado ciclo afectará al calor aportado a la cabina y, por tanto, a la temperatura del aire en el interior de la misma. Igual que la irradiancia, la temperatura exterior también será un parámetro a modificar, para poder estudiar mejor su influencia sobre la cabina del vehículo.
- **Velocidad del vehículo.** El hecho de que el vehículo se encuentre parado, se mueva a una baja velocidad o lo haga a una alta velocidad repercute directamente sobre la gestión térmica de los distintos elementos de la cabina. Por lo general, cuanto mayor sea la velocidad del vehículo y, por tanto, mayor sea la velocidad del aire rodeándolo con respecto a la del vehículo, mayor serán los coeficientes de convección exteriores de las ventanas y el techo. Es más, la convección exterior podría cambiar de ser natural a forzada, o viceversa. Así pues, los flujos de calor variarán, lo cual tendrá un impacto directo sobre la temperatura de la cabina.

Es importante comprender cómo afecta la velocidad del vehículo a los coeficientes de convección exterior. En general, en el modelo se ha considerado que, para el interior de la cabina, existe convección natural y, para el exterior, se ha considerado convección natural o forzada, según sea la velocidad del vehículo en cada momento. Los coeficientes de convección se han calculado de acuerdo a las ecuaciones 11 a 13 para superficie plana

horizontal (es decir, para el techo). Las ecuaciones 11 y 12 son para el caso en el que la superficie superior sea más caliente que la inferior, y la ecuación 13 para el caso en el que la superficie superior esté a una temperatura menor que la inferior.

Para convección natural (Techo):

$$Nu_l = 0.54Ra_l^{0.25} (10^4 < Ra_l \leq 10^7) \quad (11)$$

$$Nu_l = 0.15Ra_l^{0.33} (10^7 < Ra_l \leq 10^{11}) \quad (12)$$

$$Nu_l = 0.27Ra_l^{0.25} (10^5 < Ra_l \leq 10^{10}) \quad (13)$$

La ecuación 14 se utiliza para el caso de superficie vertical (lo que corresponde a las ventanas), también para convección natural.

Para convección natural (Ventanas):

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.837Ra^{0.167}}{(1 + (0.492Pr)^{0.5625})^{0.471}} \right)^2 \quad (14)$$

Las ecuaciones 15 y 16 se utilizan para cualquier superficie, si la convección es forzada.

Para convección forzada si el flujo es laminar, es decir, flujo de fluido (aire) ordenado en que se mueve en una trayectoria suave (normalmente para valores de $Re < 5000$):

$$Nu_x = 0.664Re^{0.5}Pr^{1.5} \quad (15)$$

Para convección forzada si el flujo es turbulento, es decir, flujo del fluido caótico, en el que la trayectoria de las partículas forma remolinos (normalmente para valores de $Re > 5000$):

$$Nu_l = (0.037Re^{0.8} - 871)Pr^{0.33} \quad (16)$$

Para lo cual:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (17)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_{air})L^3}{\nu^2} \quad (18)$$

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \quad (19)$$

Donde L es la longitud característica del elemento; h es el coeficiente de convección; k_f es la conductividad térmica del fluido; v es la velocidad del fluido respecto al elemento; ν es la viscosidad cinemática del fluido; g es la aceleración de la gravedad; T_s y T_{air} son las temperaturas de la superficie y el aire respectivamente y β es el coeficiente de dilatación volumétrica.

- **Número de ocupantes.** Tal y como se ha visto en el apartado 4.2.4, cada ocupante que tenga el vehículo se tendrá en cuenta como una generación de calor en el interior de la cabina. Evidentemente, cuantos más ocupantes haya, mayor será el calor aportado directamente al interior de la cabina.

4.4 SALIDAS DEL MODELO

Una vez explicadas las entradas del modelo, es importante saber cuáles son las salidas, es decir, aquellos resultados del modelo que serán más relevantes y que servirán para validarlo. Se pueden obtener gran cantidad de resultados, en concreto, las temperaturas de todas las superficies consideradas (las temperaturas del techo y la ventana por el interior y por el exterior, la temperatura de la base, la temperatura del aire de la cabina, los flujos de calor transmitidos a la cabina...). Sin embargo, la temperatura del aire de la cabina toma especial relevancia, ya que se tienen valores medidos experimentalmente, obtenidos a partir del artículo [ref. 1], y también es especialmente importante desde el punto de vista de gestión térmica, para el diseño del sistema HVAC. Además, bajo este punto de vista, también se consideran de relevancia los flujos de calor de los elementos de la cabina.

- **La temperatura del aire en el interior de la cabina.** Este será el resultado utilizado para validar el modelo con el artículo [ref. 1]. Además, este parámetro dará paso a diseñar un sistema HVAC y poder mantener la temperatura en el interior de la cabina dentro de unos límites confortables para el usuario.
- **Los flujos de calor de los elementos de la cabina.** Será relevante para conocer el orden de magnitud de los flujos de calores que se producen en los distintos elementos de la cabina, así como para obtener información de aquellos que absorben o transmiten calor al resto.
- Como salidas secundarias, que no son tan importantes para el modelo y su validación como lo son los dos anteriores, están las temperaturas interiores y exteriores de las 4 ventanas y el techo, y la temperatura de la base, como ya se ha mencionado anteriormente.

En la Figura 24, se muestra un esquema con las condiciones de contorno, datos geométricos y termofísicos y salidas del modelo.

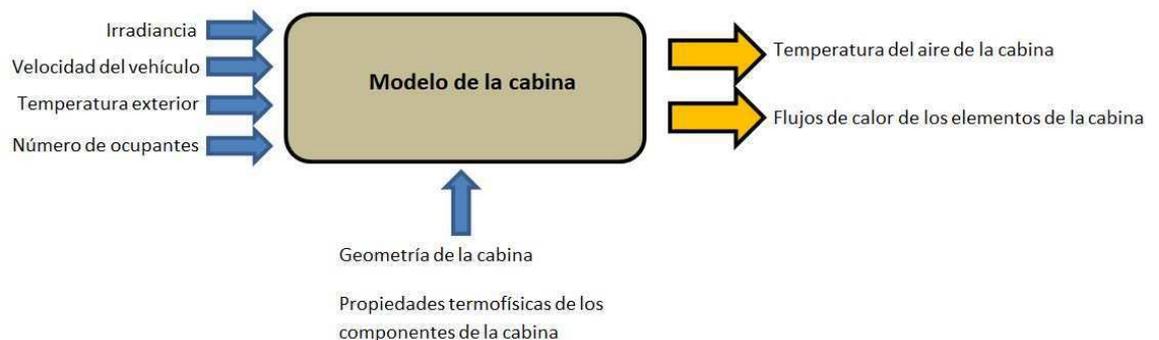


Figura 24. Esquema de las condiciones de contorno, datos de materiales y fluidos y salidas del modelo

4.5 TEST A VALIDAR

En este modelo, se realizan dos ensayos (test) tomando como referencia dos de los ensayos realizados en la literatura [ref. 1]. Una vez realizado el modelo y simuladas ambas situaciones, se valida la evolución de la temperatura del aire en el interior de la cabina con la simulada en el artículo. Evidentemente, habrá cierta variabilidad entre ambos modelos, puesto que no están programados idénticamente. La temperatura simulada en el artículo ha sido previamente validada con datos experimentales, lo cual ha resultado imposible de realizar en este TFG.

A continuación, se pueden ver con más detalle los dos test realizados con el modelo térmico de la cabina. El primero de ellos se realiza con el vehículo parado, para comprobar la bondad del modelo en estas condiciones. El segundo se realiza con el vehículo circulando a una velocidad variable.

4.5.1 TEST 1: VEHÍCULO PARADO

El test 1 se ha realizado con las siguientes condiciones de contorno y ambientales, tomadas de mediciones experimentales de la literatura [ref. 1]:

- **Tiempo:** el tiempo total de este ensayo ha sido de 3.66 horas.
- **Velocidad del vehículo:** la velocidad del vehículo es nula durante todo el test.
- **Ocupantes:** se ha considerado que el vehículo no tiene ningún ocupante en todo el ensayo.
- **Irradiancia:** La evolución de la irradiancia incidente sobre el techo y las ventanas del vehículo durante el test 1 se puede observar en la Figura 25:

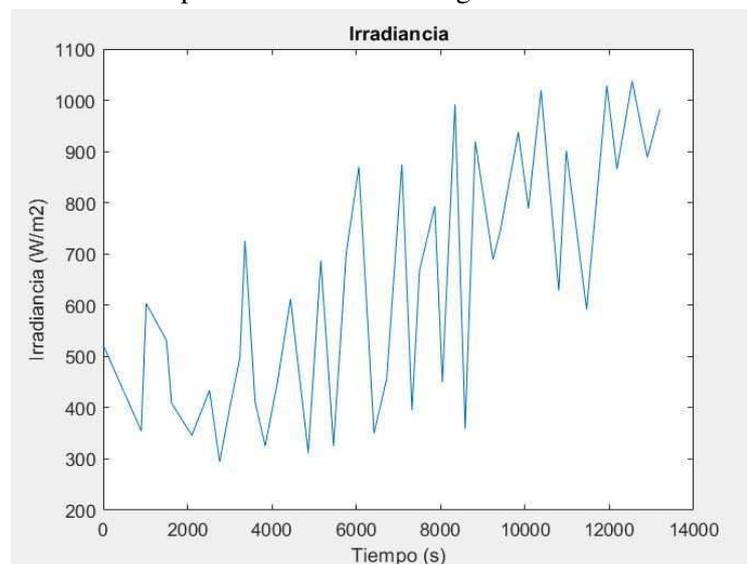


Figura 25. Irradiancia incidente sobre el vehículo para el test 1

Como se puede observar en la figura 25, la irradiancia tiene una gran variabilidad a lo largo de todo el ensayo, empezando en valores en torno a $500 \frac{W}{m^2}$, y llegando a unos $1000 \frac{W}{m^2}$.

- **Temperatura exterior:** la evolución de la temperatura en el exterior es la que se muestra en la Figura 26, donde se puede observar que la temperatura exterior del vehículo aumenta de unos $22,5^{\circ}\text{C}$ (al principio del ensayo) hasta unos 29°C (al final del ensayo):

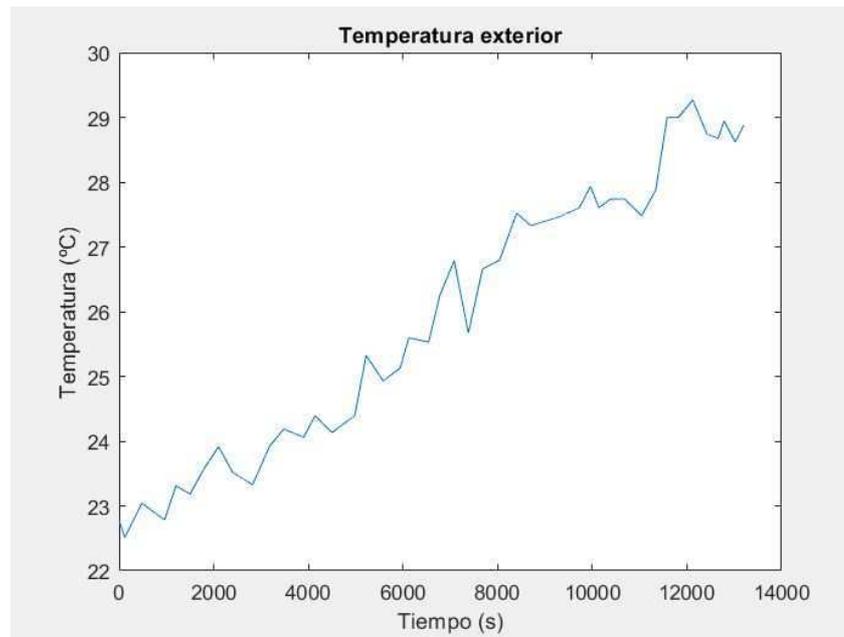


Figura 26. Evolución de la temperatura exterior para el test 1

4.5.2 TEST 2: VEHÍCULO EN MOVIMIENTO

El test 2 ha sido realizado en las siguientes condiciones de contorno y ambientales, tomadas de mediciones experimentales de la literatura [ref. 1]:

- **Tiempo:** el tiempo total para el que se ha realizado este test es de 0.66 horas
- **Velocidad del vehículo:** a diferencia del test 1, en este test el vehículo está en movimiento, y presenta la evolución de velocidad observada en la Figura 27:

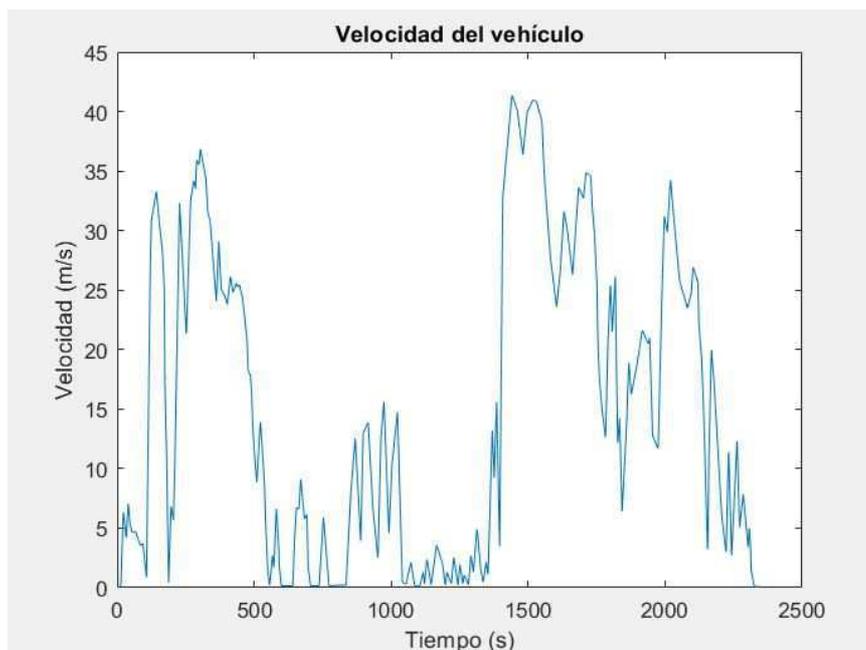


Figura 27. Evolución de la velocidad para el test 2

Como puede comprobarse, la velocidad presenta grandes cambios a lo largo de todo el ciclo, llegando incluso a rebasar los $40\frac{m}{s}$.

- **Ocupantes:** para el test 2, se considera que hay un ocupante dentro del vehículo.
- **Irradiancia:** La evolución de la irradiancia incidente sobre el techo y las ventanas del vehículo durante este ensayo se muestra en la Figura 28:

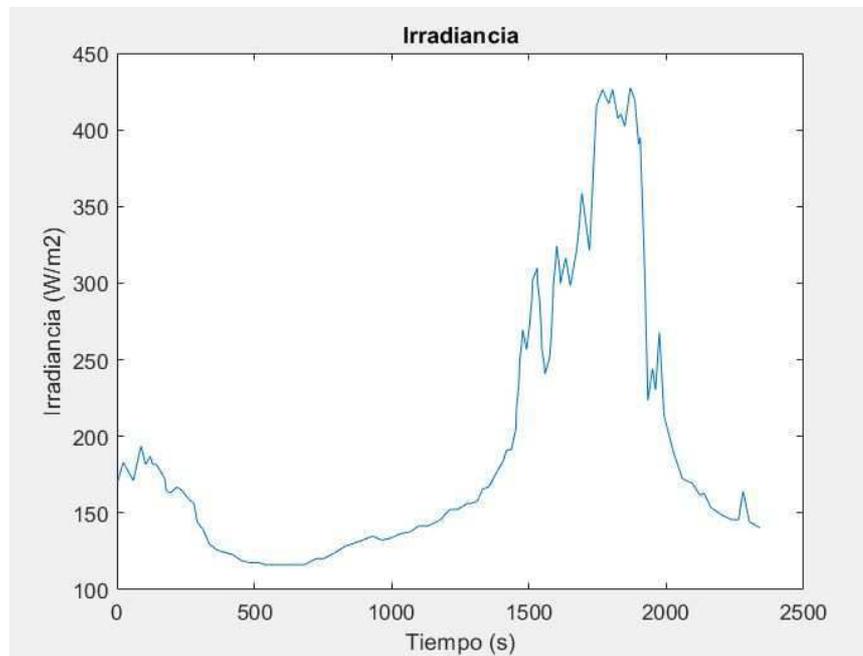


Figura 28. Evolución de la irradiancia para el test 2

Tal y como se puede observar, la irradiancia comienza en valores considerablemente bajos (en torno a $170\frac{W}{m^2}$), sube hasta rebasar los $400\frac{W}{m^2}$ y, finalmente, baja de manera abrupta hasta acabar el ensayo en unos $150\frac{W}{m^2}$.

- **Temperatura exterior:** la temperatura en el exterior a lo largo del periodo de tiempo para el cual se realiza el test 2 es la que se muestra en la Figura 29:

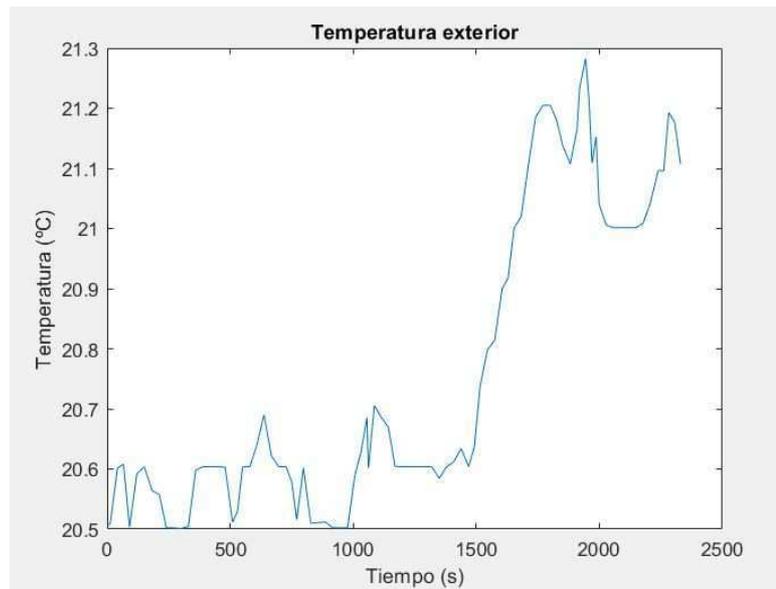


Figura 29. Evolución de la temperatura exterior para el test 2

Tal y como se puede ver, la temperatura no sufre grandes variaciones, oscilando entre los 20.5°C y los 21.2°C, aproximadamente.

5. RESULTADOS

En este apartado, se presentan los distintos resultados obtenidos de las simulaciones de los test y los ensayos. Se muestran los resultados de la validación del modelo con las medidas expuestas en el apartado 4.5 y, más adelante, los resultados de ensayos adicionales realizados.

5.1 RESULTADOS TEST 1

Los principales resultados que se estudian en el test 1 son los flujos de calor hacia el interior de la cabina y la temperatura del aire interior de la cabina. En la Figura 30, se compara la temperatura interior de la cabina obtenida con los resultados de la ref. 1. En la Figura 31 se muestran otros resultados que permite al modelo, por ejemplo, determinar la carga térmica que debería ser capaz de evacuar el sistema de aire acondicionado.

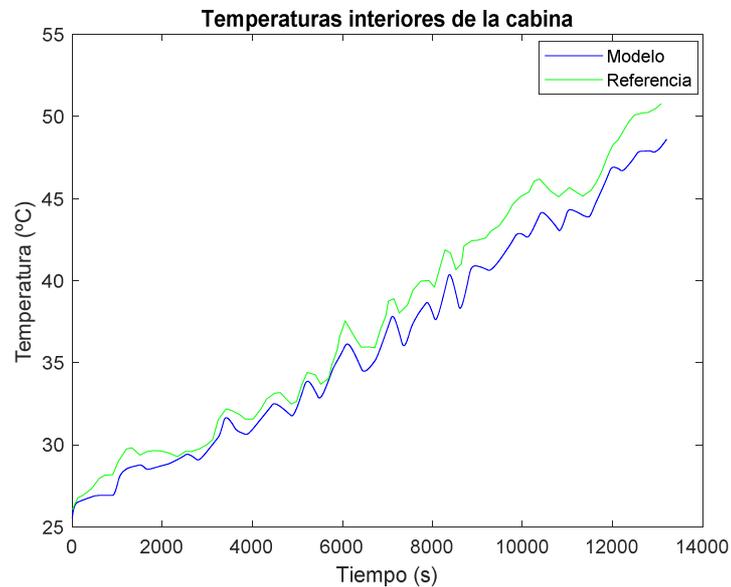


Figura 30. Gráfico de la temperatura de la cabina del modelo CMT junto con la referencia (Test 1)

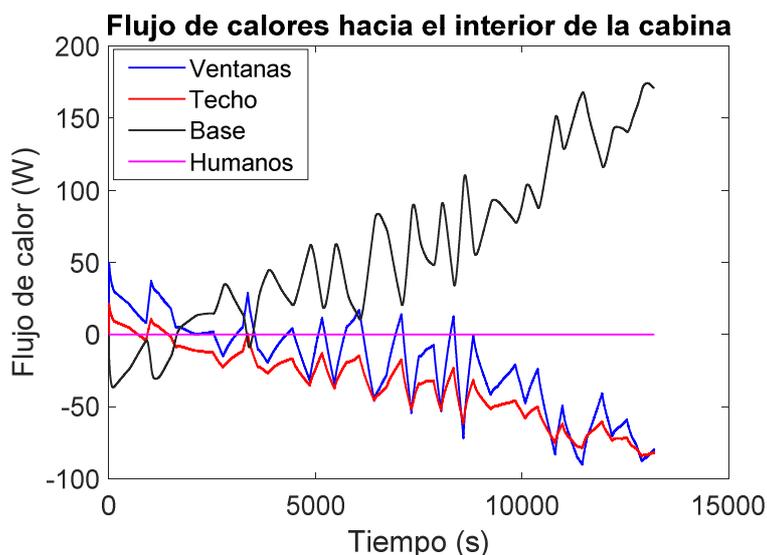


Figura 31. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina (Test 1).

Si se contrasta el modelo de este TFG (Modelo CMT) con la referencia para las temperaturas de la cabina (Figura 30), se puede concluir que queda correctamente validado. Se consigue capturar con mucha precisión la tendencia de la evolución de la temperatura, siendo el error tan pequeño que se puede considerar válido. Las principales fuentes de error pueden ser la frecuencia de muestreo de la irradiancia de la literatura, debido a la cual pueden existir variaciones en la temperatura de la cabina. Además, el hecho de haber tomado ciertas simplificaciones, como reducir a 3 los elementos considerados en la cabina, puede ser también fuente de errores a la hora de calcular las transferencias de calor y, por tanto, la temperatura de la cabina.

Como se puede observar, a medida que la temperatura exterior (Figura 26) y la irradiancia incidente sobre el vehículo (Figura 25) aumentan, también lo hace la temperatura interior de la cabina. Debido a que dicha irradiancia aumenta constantemente (aunque realiza subidas y bajadas pronunciadas) durante todo el ensayo, y la velocidad es nula (por lo que la convección exterior es mucho menor), también aumenta la temperatura de la cabina constantemente. Por otro lado, observando el flujo de calores de la cabina (Figura 31), se puede constatar que es la base la que desprende calor hacia la cabina, llegando hasta los 170W aproximadamente (la base es el elemento que más altas temperaturas presenta, como se podrá ver en la Figura 32). Sin embargo, el techo y las ventanas actúan al contrario, es decir, absorbiendo calor de la cabina. Por este motivo, sus calores son negativos, lo que significa que el flujo de calor es de la cabina hacia el techo y las ventanas, llegando a ser este valor casi 100W.

Adicionalmente, también se obtuvo información acerca de las temperaturas de los distintos elementos de la cabina, es decir, las temperaturas interior y exterior de las cuatro ventanas y el techo, y la temperatura de la base. En la Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se pueden observar dichos gráficos:

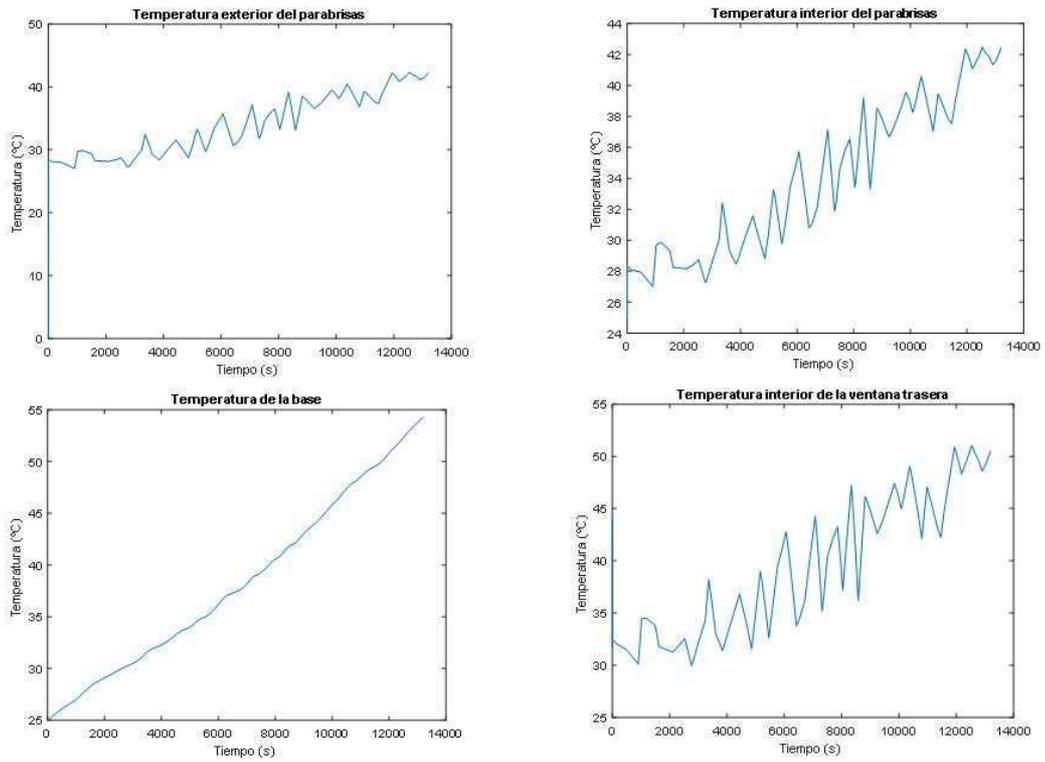


Figura 32. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 1)

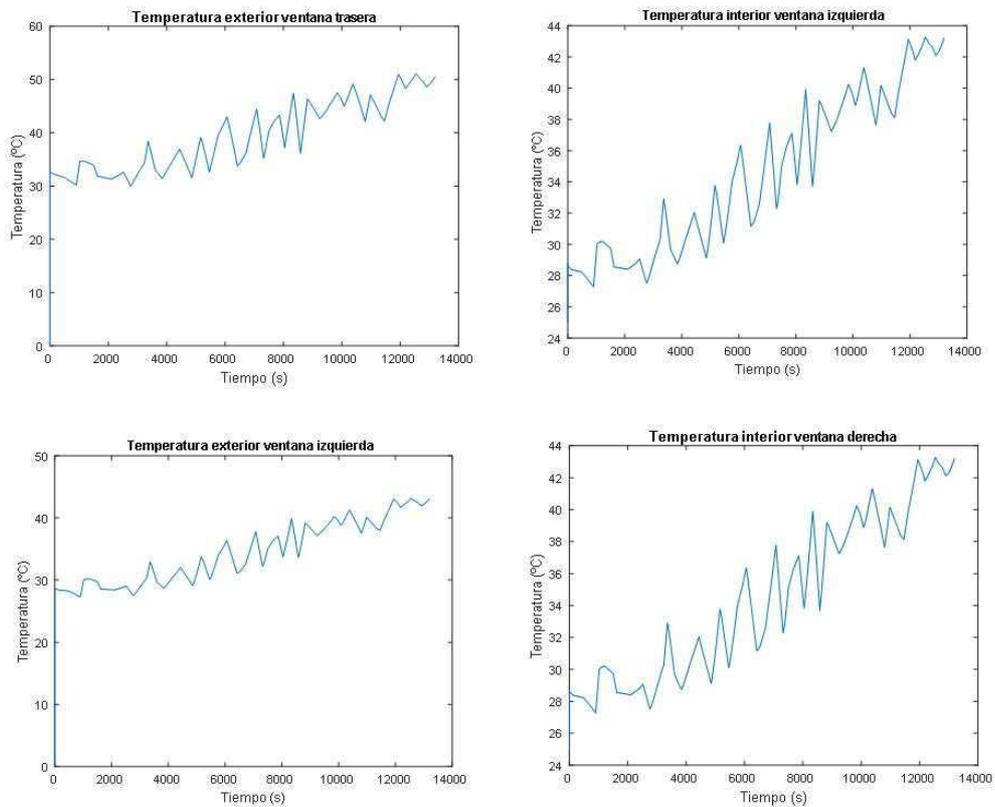


Figura 33. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 1)

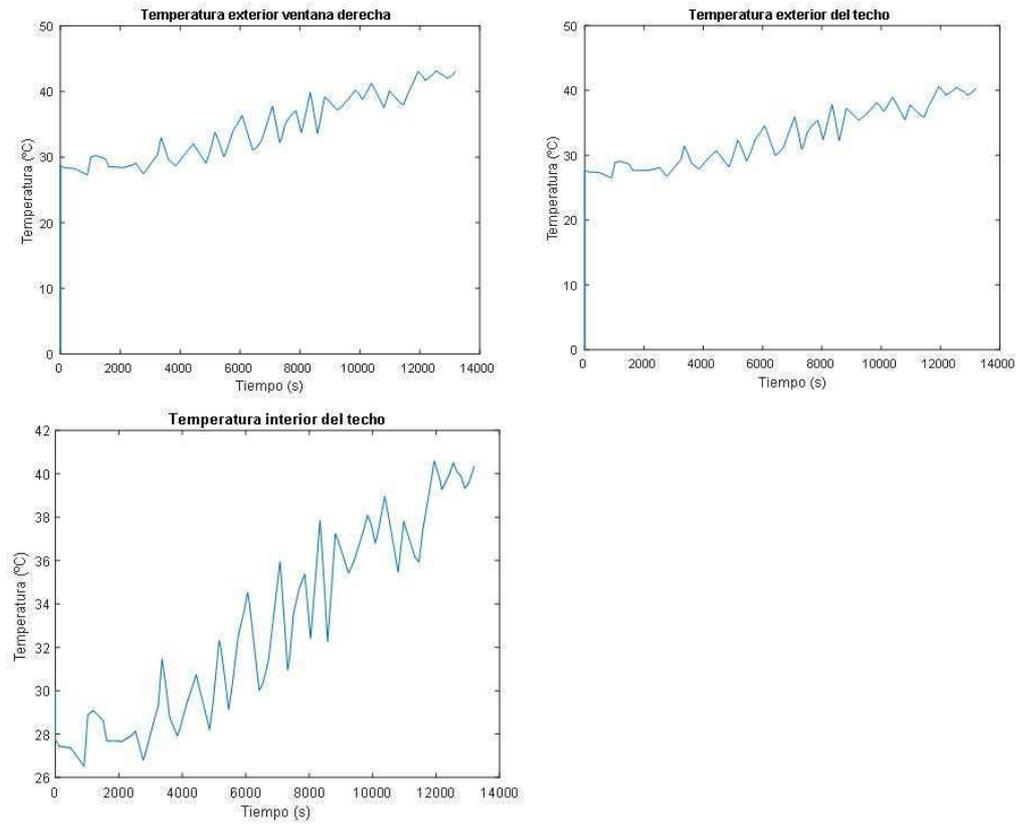


Figura 34. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 1)

Por último, se puede observar en la Figura 35 la evolución de las temperaturas de la base, del interior de la cabina y del ambiente. Se puede comprobar que, debido al aumento de la irradiancia incidente sobre el vehículo, a pesar de que la temperatura exterior no aumenta demasiado rápidamente, sí lo hacen la temperatura del aire interior y, sobre todo, la temperatura de la base (elemento que absorbe toda la irradiancia transmitida a través de la ventana, que supone un aumento adicional de la temperatura).

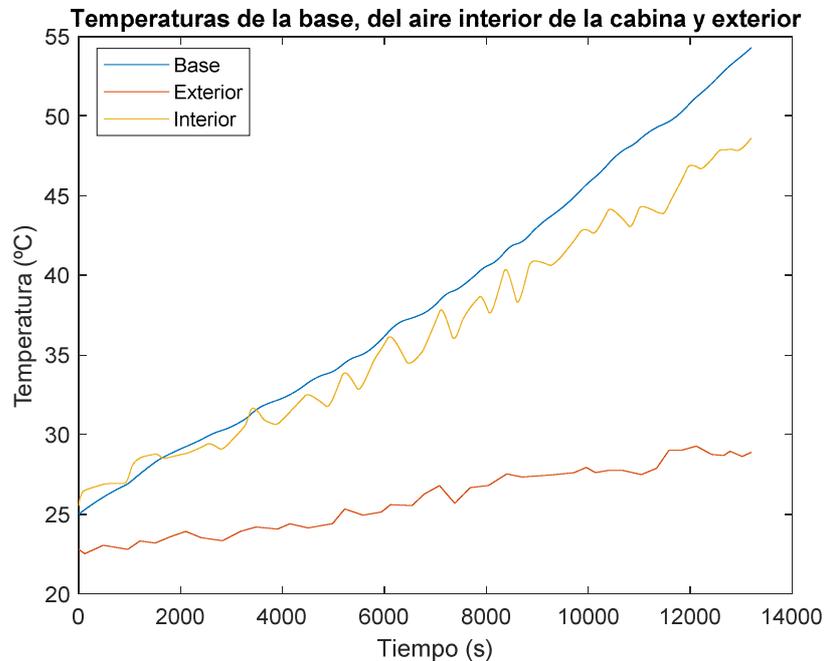


Figura 35. Gráfico de la evolución de las temperaturas de la base, interior de la cabina y exterior

5.2 RESULTADOS TEST 2

Los principales resultados, o salidas, que se buscan en el test 2, igual que para el test 1, son los flujos de calor hacia el interior de la cabina y la temperatura del aire interior de la cabina. En la Figura 36, se compara la temperatura interior de la cabina obtenida con los resultados de la ref. 1. En la Figura 37 se muestran otros resultados que permite al modelo, por ejemplo, determinar la carga térmica que debería ser capaz de evacuar el sistema de aire acondicionado.

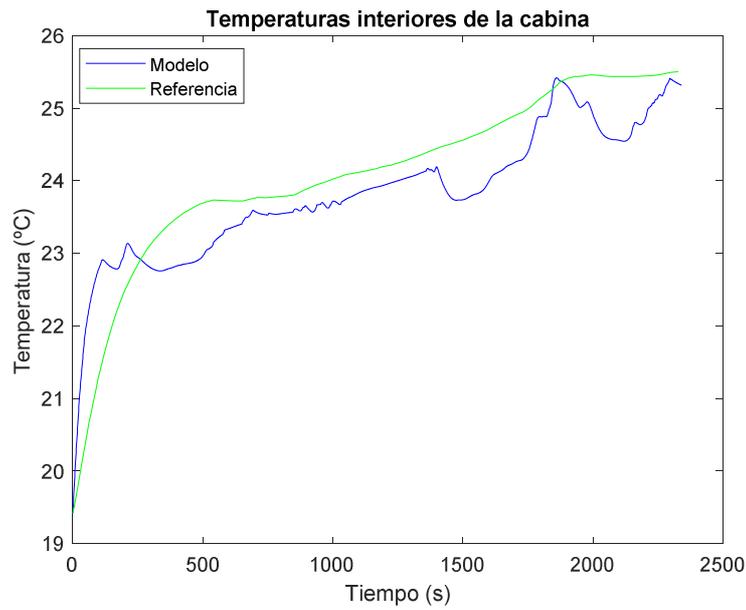


Figura 36. Gráfico de la temperatura de la cabina del modelo CMT junto con el modelo del artículo (Test 2)

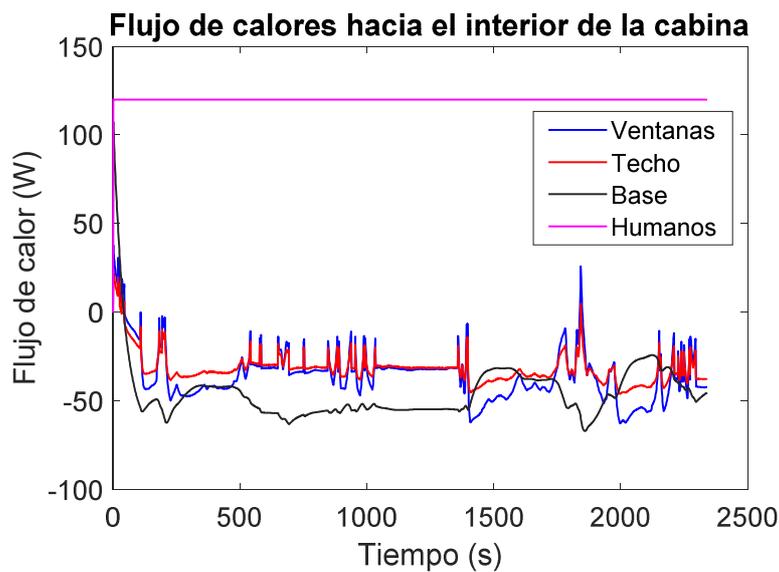


Figura 37. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina (Test 2)

A diferencia del test 1, el test 2 tiene más peculiaridades, que se explican a continuación.

Como ya se ha explicado, en la Figura 36 se presenta la evolución de la temperatura del aire interior de la cabina obtenida por el modelo y la de la referencia. Se puede observar que el modelo es capaz de predecir la tendencia de la evolución de la temperatura, que va aumentando durante el ciclo. Comparando la temperatura obtenida por el modelo y la referencia se puede observar que el modelo es capaz de captar la dinámica de las variaciones de temperatura del aire dentro de la

cabina. Por ejemplo, el pico de temperatura observado a los 1850 segundos de ciclo se debe, precisamente, al pico de irradiancia, tal y como se muestra en la Figura 28.

Por otro lado, se observa que los primeros 500 segundos la temperatura calculada por el modelo y la referencia llegan hasta los 23.5°C, debido principalmente al calor generado por el ocupante (lo cual no ocurría en el test 1, donde no había ocupantes).

Ciertamente, el aumento de la temperatura de la cabina es mayor en los periodos de tiempo en los que la velocidad del vehículo es menor y la irradiancia es mayor.

En general, el modelo se ha considerado capaz de predecir con precisión la evolución de la temperatura del aire, y además captar la dinámica producida por la variación de velocidad del vehículo, lo cual era imposible de comprobar en el test 1.

En el gráfico de los flujos de calor, las principales diferencias con respecto al test 1 son que el calor debido a los humanos (es decir, los ocupantes del vehículo), es distinto de 0 (120W). Además, en este caso, la base está absorbiendo calor del aire de la cabina en lugar de cederlo (entre 80 y 100W), y los calores del techo y las ventanas apenas varían de 0, es decir, a veces absorben o a veces ceden calor, pero siempre en cantidades muy inferiores a la base o los humanos). Estas notables diferencias pueden deberse a la temperatura exterior, sensiblemente distinta a la del test 1 (menor) y, sobre todo, al hecho de que el vehículo se mueve con una velocidad, siendo ésta a veces muy elevada. Esto último hace que el calor por convección exterior tenga una gran variabilidad.

Además, igual que para el test 1, también se obtuvieron las temperaturas de los distintos elementos de la cabina, es decir, las temperaturas interior y exterior de las cuatro ventanas y el techo, y la temperatura de la base. En la Figura 38, la Figura 39 y la Figura 40 se pueden observar dichos gráficos:

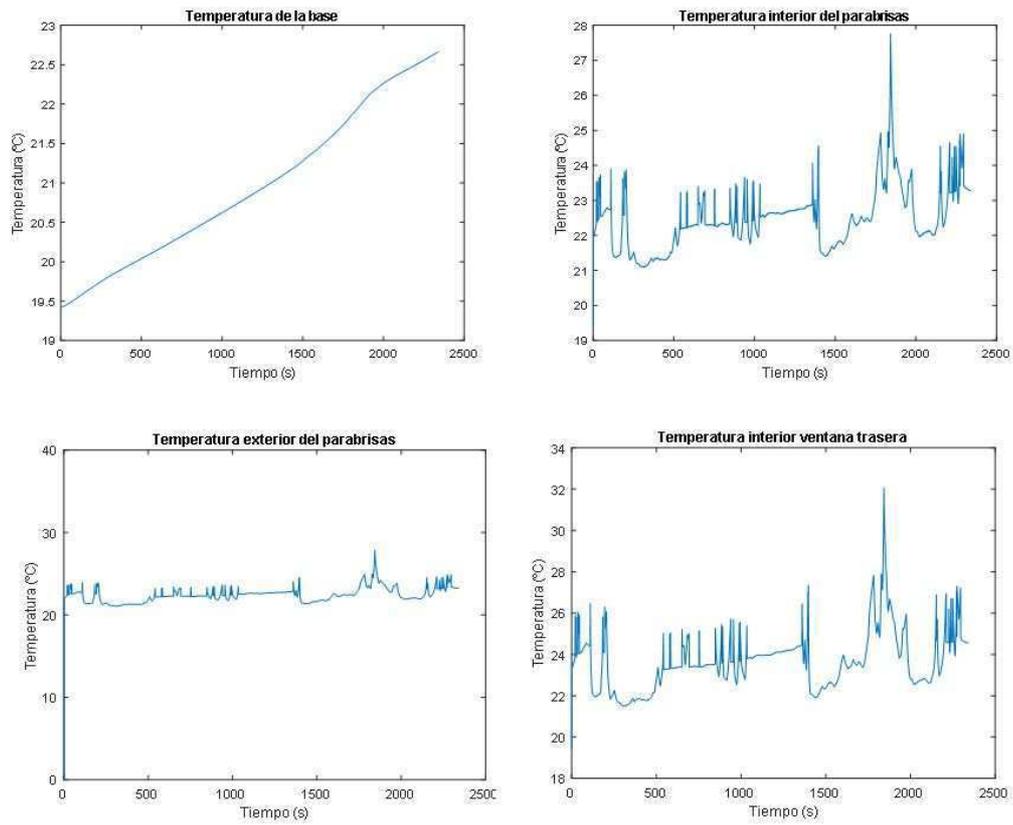


Figura 38. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 2)

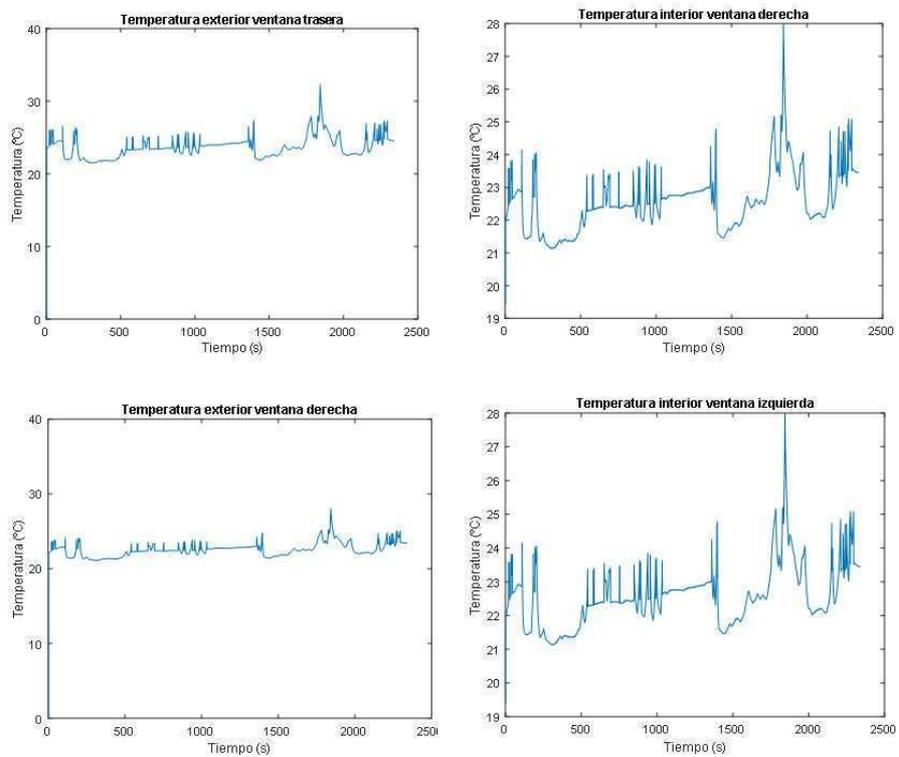


Figura 39. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 2)

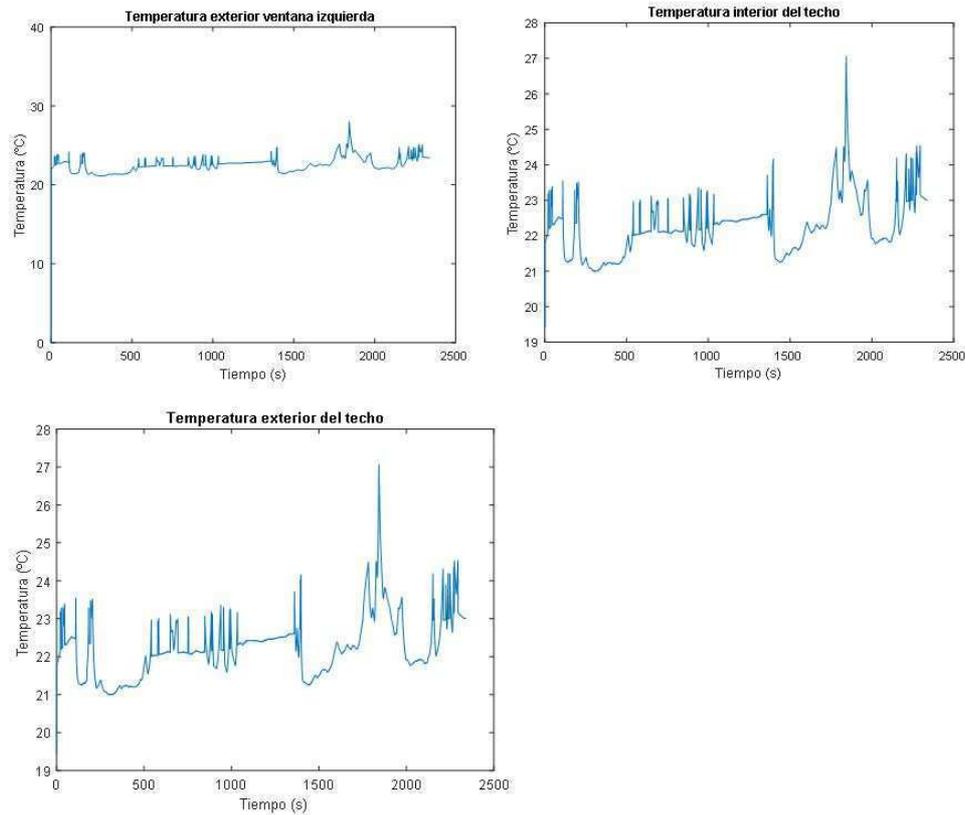


Figura 40. Gráficos de las temperaturas de los demás elementos de la cabina (Test 2)

Por último, en la Figura 41 se puede observar un gráfico con la evolución de la temperatura de la base, la temperatura interior y la temperatura ambiente.

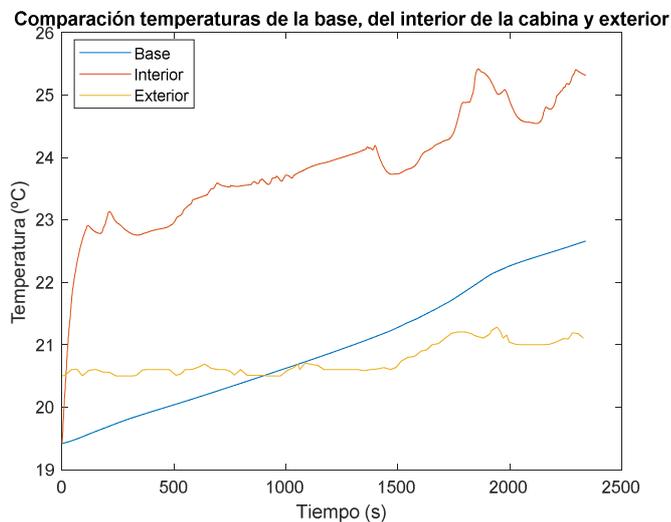


Figura 41. Gráfico con las temperaturas de la base, interior de la cabina y exterior

Como se puede ver, la temperatura exterior se encuentra por debajo de la temperatura interior de la cabina tras el primer periodo de rápido crecimiento de la temperatura interior. Esto produce que el aumento de la temperatura del aire de la cabina decrezca, llegando a una temperatura máxima de 25.5°C transcurridos 2000 segundos.

Una vez se ha validado el modelo, se han llevado a cabo tres estudios para estudiar la evolución de los flujos de calores y de la temperatura del aire de la cabina y evaluar la diferencia de éstas con respecto a los test originales. Precisamente este es un objetivo perseguido en este TFG, evaluar la utilidad y la respuesta del modelo cuando se cambian las condiciones en las que ha sido validado.

5.3 ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DEL NÚMERO DE OCUPANTES

En este estudio, se han considerado exactamente las mismas entradas y condiciones que en el test 2, con la única diferencia de que en lugar de haber un solo ocupante, en este estudio habrá 5 ocupantes en el vehículo. De este modo, se podrá observar la evolución de los flujos de calor de los distintos elementos de la cabina, así como la evolución de la temperatura del aire en su interior (que, con el objetivo de analizar los resultados en los estudios, se han seleccionado las salidas más relevantes) cuando la ocupación del vehículo es mucho más alta y se tiene mayor generación de calor en su interior.

5.3.1 RESULTADOS

En la Figura 42 y en la Figura 43, se muestran únicamente los resultados de las dos salidas (o variables de estudio) más relevantes ya mencionadas, es decir, de la temperatura interior de la cabina y de los flujos de calor hacia la misma. En la Figura 42, se muestran los resultados de temperatura comparándolos con el test 2 original (un ocupante):

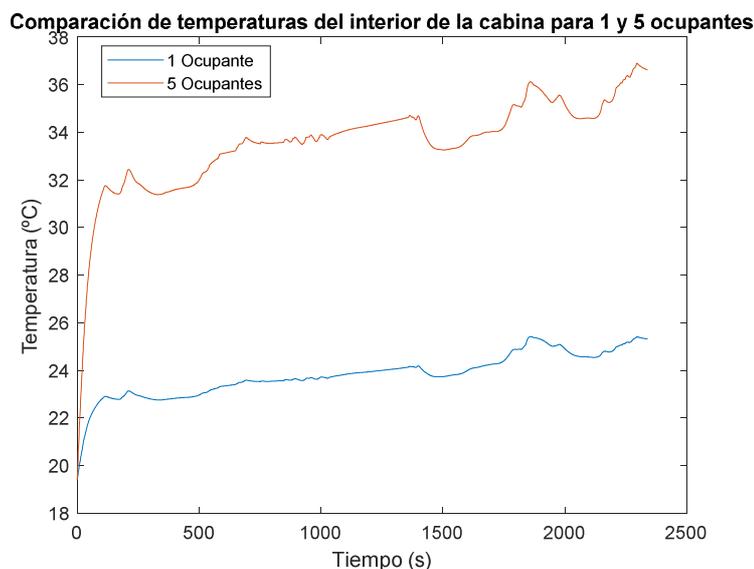


Figura 42. Gráfico de la evolución de la temperatura del aire de la cabina para 1 y 5 ocupantes (Estudio ocupantes)

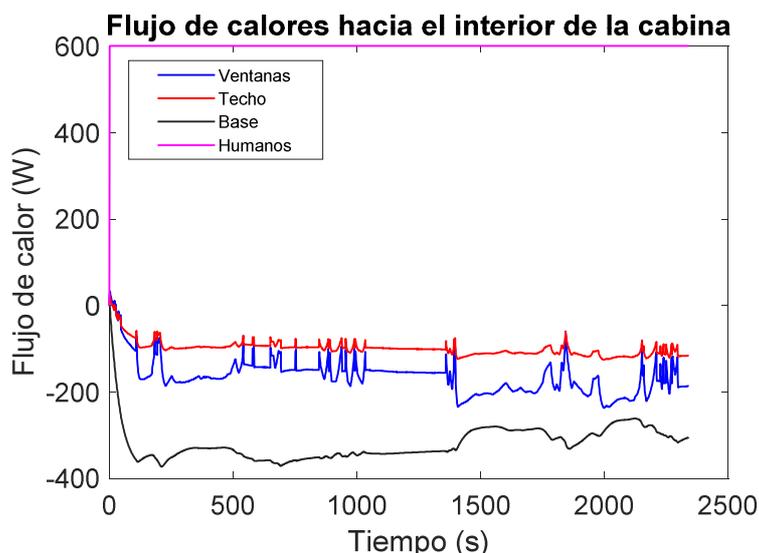


Figura 43. Gráfico de los flujos de calor de los elementos de la cabina hacia el interior de la misma con 5 ocupantes (Estudio ocupantes)

En el gráfico de las temperaturas interiores de la cabina (Figura 42), se puede observar que, al haber 4 ocupantes adicionales en este estudio que en el test 2 original, la temperatura sube más rápidamente al principio, y se mantiene en valores hasta 10°C más altos que la simulación con 1 ocupante, al tener el calor de 4 ocupantes adicionales cedido al aire de la cabina.

Para este estudio, el cambio más importante que se puede observar en el gráfico de los flujos de calor es que el calor aportado por los humanos es de 600W, es decir, el equivalente a los 5 ocupantes del vehículo para este estudio. Aquí, igual que ocurría en el test 2 original, el flujo de calor va de la cabina a la base, es decir, la base está absorbiendo calor, aunque en este caso la cantidad es mucho mayor (entre 300 y 400W), debido precisamente al mayor número de ocupantes, que generan más calor en el interior del vehículo. Además, el techo y las ventanas también están absorbiendo calor, en torno a 100W y 200W.

5.4 ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DEL LUGAR GEOGRÁFICO: LEÓN

Además de variar el número de ocupantes, puede ser muy interesante conocer cuál va a ser la evolución de la temperatura interior de la cabina si el vehículo se encuentra en una localización distinta, con una climatología distinta y, por tanto, tiene unas entradas diferentes a las consideradas en los test 1 y 2.

Para este estudio, se han replicado las condiciones de ambos test, únicamente variando dos entradas: la **temperatura ambiente** y la **irradiancia**, ambas dependientes de la geografía del lugar. Es decir, manteniendo el tiempo del ensayo, la velocidad del vehículo y el número de ocupantes de cada test, se ha introducido la temperatura ambiente e irradiancia del mismo día de los test para la localidad española de León, situada en el noroeste peninsular. Para ello, se ha obtenido información sobre la evolución de la irradiancia y la temperatura ambiente de León para un día típico de la época del año de los test (junio). En la Figura 44, se muestra la evolución de la irradiancia global. En la Figura 45, se muestra la evolución de la temperatura exterior:

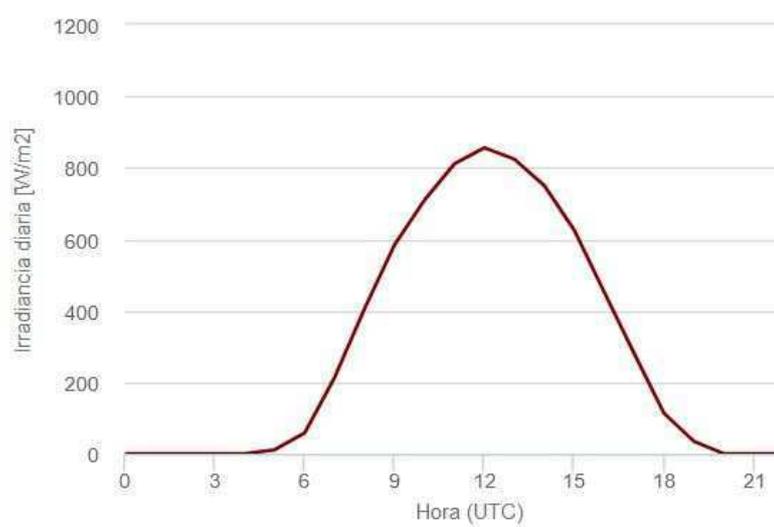


Figura 44. Gráfico de la evolución de la irradiancia global en León para un día típico de junio. Fuente: ref. 4

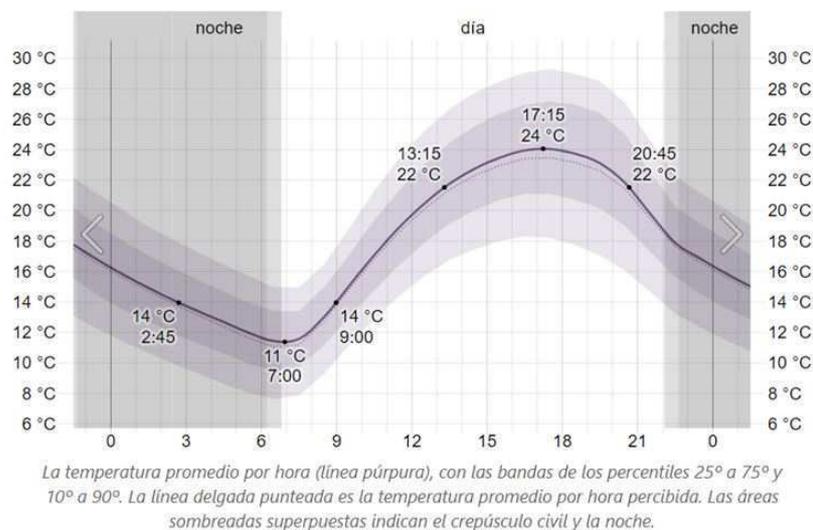


Figura 45. Gráfico de la evolución de la temperatura ambiente de León para un día típico de junio. Fuente: ref. 5

5.4.1 RESULTADOS PARA TEST 1

Las gráficas de la temperatura de la cabina (Figura 46) y de los flujos de calor en la cabina (Figura 47), que son de especial relevancia para el estudio de León, considerando las condiciones del Test 1, son las siguientes:

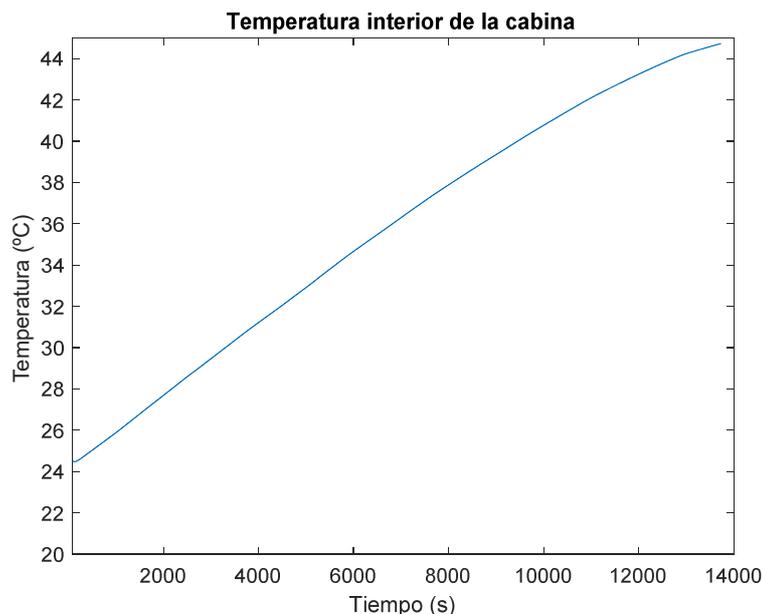


Figura 46. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de León (Test 1)

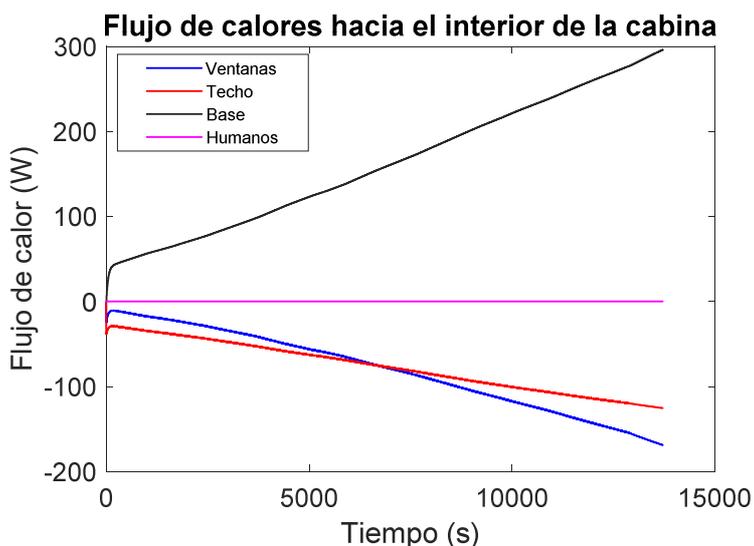


Figura 47. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de León (Test 1)

En el primer gráfico (Figura 46), se puede observar que para el caso de León, al tener una temperatura exterior considerablemente más baja, la temperatura alcanzada en el interior de la cabina al final del ensayo es sensiblemente menor que en el test original (45°C frente a 47°C, aproximadamente). Esta diferencia tan pequeña se debe a que la irradiancia, que es un factor muy importante en los flujos de calor en la cabina, no difiere mucho para este estudio de la del test 1 original.

En cuanto a los flujos de calor, en este estudio es la base la que cede calor a la cabina, calentando el aire interior, mientras que las ventanas y el techo absorben dicho calor para transmitirlo al exterior. En este caso, el calor cedido por la base en comparación con el test 1 original alcanza valores más

altos (hasta 300W). Esto puede deberse a que la temperatura exterior es menor en este estudio y, por tanto, la base (que recibe la irradiación transmitida por las ventanas) cede más calor a la cabina, absorbido a su vez por las ventanas y el techo. Todos los calores presentan menos variabilidad que el test 1 original, debido a que la irradiación incidente sobre el vehículo en este estudio no muestra los picos tan acusados que muestra la irradiación sobre el test 1.

5.4.2 RESULTADOS PARA TEST 2

Las gráficas de la temperatura de la cabina (Figura 48) y de los flujos de calor en la cabina (Figura 49), que son de especial relevancia para el estudio de León, considerando las condiciones del Test 2, son las siguientes:

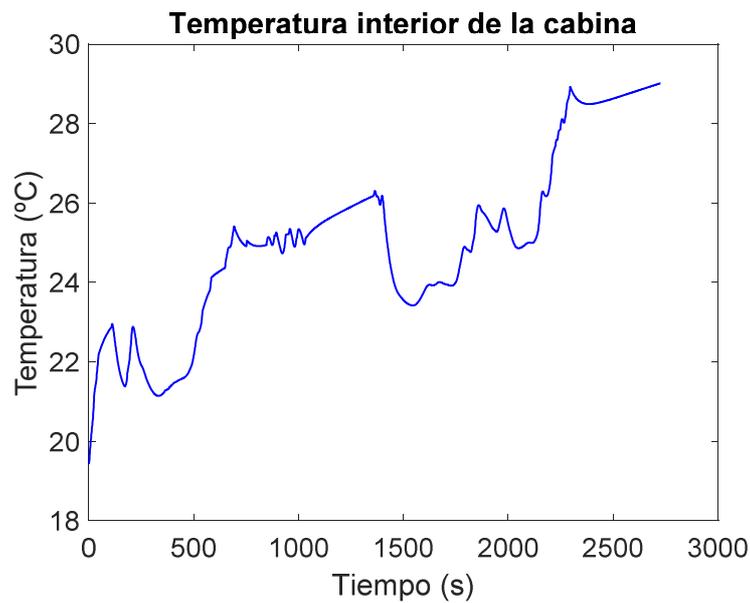


Figura 48. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de León (Test 2)

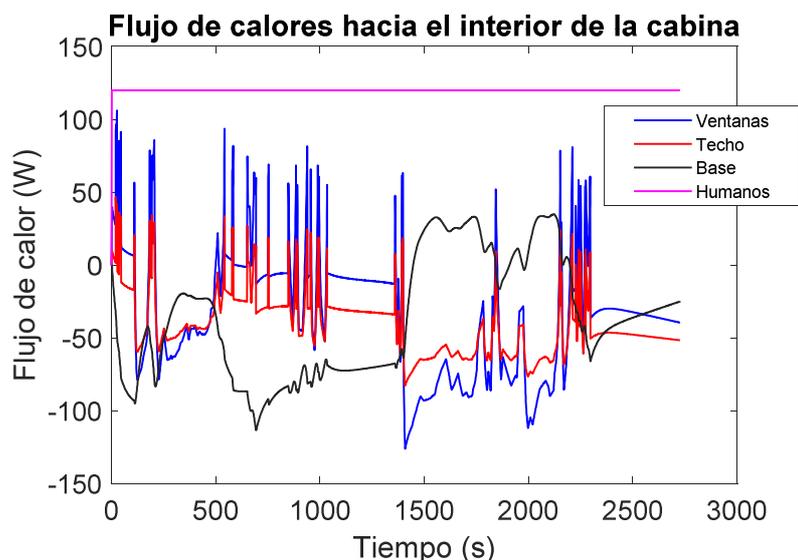


Figura 49. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de León (Test 2)

Para el estudio de León en las condiciones del test 2, tal y como se observa en el gráfico de la temperatura interior de la cabina (Figura 48), la temperatura alcanzada al final del ciclo es mayor que en el test 2 original (29°C frente a 25°C). Esto es debido a que, a pesar de que para el estudio de León, la temperatura es más baja, la irradiancia sobre el vehículo es mucho mayor, lo cual se traduce en más calor hacia la cabina, y una temperatura superior.

En el gráfico de los flujos de calor (Figura 49), se puede apreciar que, a excepción del calor de los humanos, que es constante y su valor es el correspondiente a un ocupante (como el test 2 original), los flujos de calor de las ventanas, el techo y la base tiene una fluctuación muy alta, generalmente entre los -100W y los 100W. Esto quiere decir que existen momentos en los que estos elementos ceden calor a la cabina (flujos positivos), y otros en los que absorben calor de la cabina (flujos negativos).

5.5 ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DEL LUGAR GEOGRÁFICO: MARRAKECH

En este apartado se pretende realizar un estudio idéntico al realizado para la localidad de León, en Marrakech. Es decir, el objetivo es determinar cómo variarán los flujos de calor y la temperatura interior de la cabina si el vehículo se encuentra bajo las mismas condiciones de cada test por separado, pero bajo la temperatura exterior y la irradiancia de la ciudad de Marrakech, situada al sur de Marruecos. Para ello, se ha obtenido información sobre la evolución de la irradiancia y la temperatura ambiente de Marrakech para un día típico de la época del año de los test. En la Figura 50 se muestra la evolución de la irradiancia, y en la Figura 51 se muestra la evolución de la temperatura exterior:

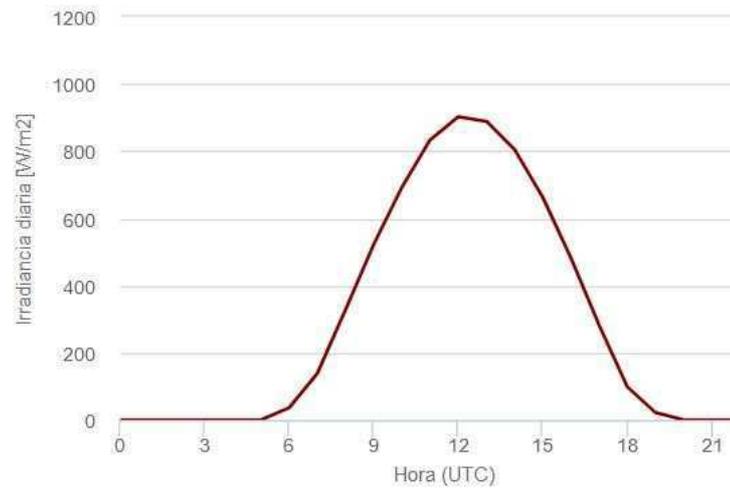


Figura 50. Gráfico de la evolución de la irradiación global en Marrakech para un día típico de junio. Fuente: ref. 4

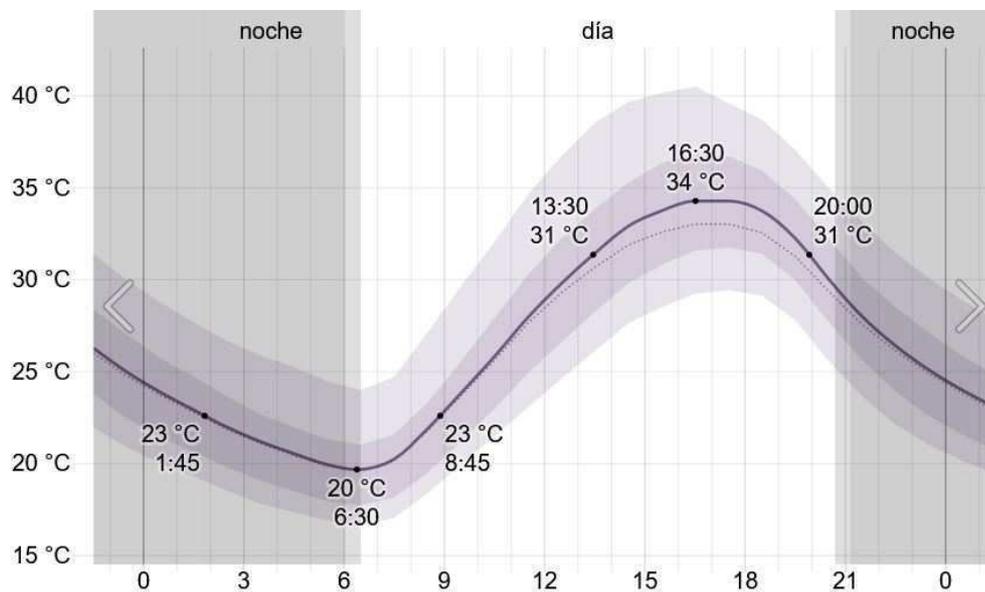


Figura 51. Gráfico de la evolución de la temperatura ambiente de Marrakech para un día típico de junio. Fuente: ref. 5

5.5.1 RESULTADOS PARA TEST 1

Las gráficas de la temperatura de la cabina (Figura 52) y de los flujos de calor en la cabina (Figura 53), que son de especial relevancia para el estudio de Marrakech, considerando las condiciones del Test 1, son las siguientes:

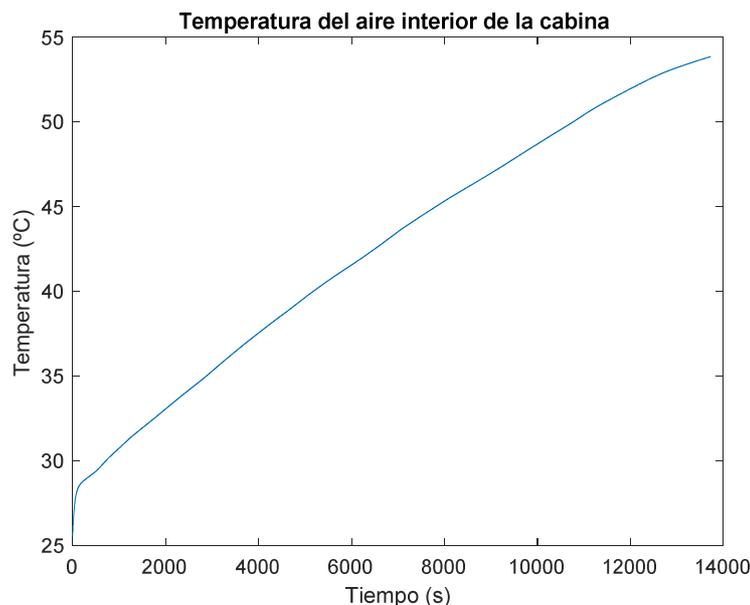


Figura 52. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de Marrakech (Test 1)

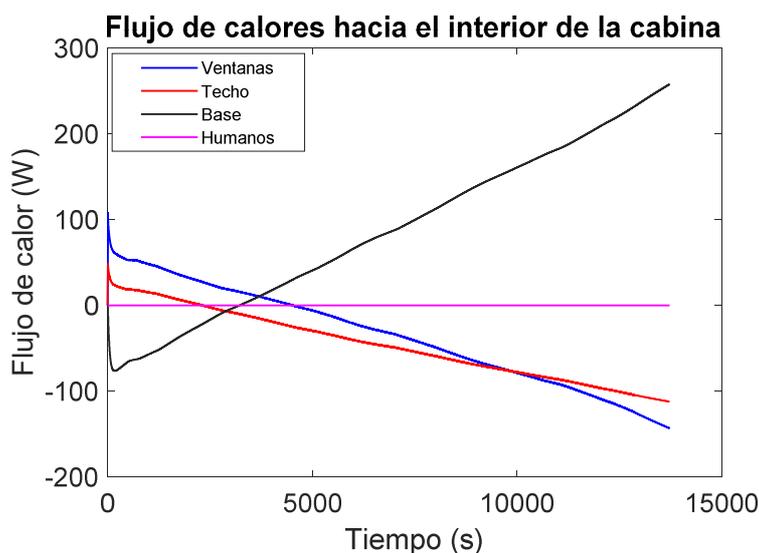


Figura 53. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de Marrakech (Test 1)

Como se puede comprobar en el gráfico de la temperatura del aire de la cabina (Figura 52), la temperatura alcanzada al final del ciclo para el estudio de Marrakech es considerablemente más alta que aquella del test 1 original (54°C frente a 48°C). Esto es debido a la mayor irradiancia (sobre todo para los primeros 8000 segundos del ciclo) y a la mayor temperatura exterior.

En cuanto a los flujos de calor, todos los elementos de la cabina siguen la tendencia que el test 1: el techo y las ventanas absorben calor a la cabina, mientras que la base cede calor. Sin embargo, debido a las diferencias en los inputs entre ambos ensayos, en los primeros 3000 segundos del test las ventanas y el techo presentan flujos de calor positivos, aunque disminuyendo, y la base presenta

un flujo de calor negativo, aunque aumentando. Esto es debido a que, al principio, el exterior está a una temperatura superior que la cabina, por lo que las ventanas y el techo ceden calor al interior (y es absorbido por la base). Sin embargo, cuando la base ya se ha calentado más que el aire interior de la cabina, el flujo se vuelve positivo, es decir, la base empieza a ceder calor a la cabina. Del mismo modo que ocurría en el estudio de León para el test 1, los calores presentan mucha menos variabilidad que el test 1 original, debido a que la irradiancia incidente sobre el vehículo en ambos estudios no muestran los picos tan acusados que muestra la irradiancia sobre el test 1.

5.5.2 RESULTADOS PARA TEST 2

Las gráficas de la temperatura de la cabina (Figura 54) y de los flujos de calor en la cabina (Figura 55), que son de especial relevancia para el estudio de Marrakech, considerando las condiciones del Test 2, son las siguientes:

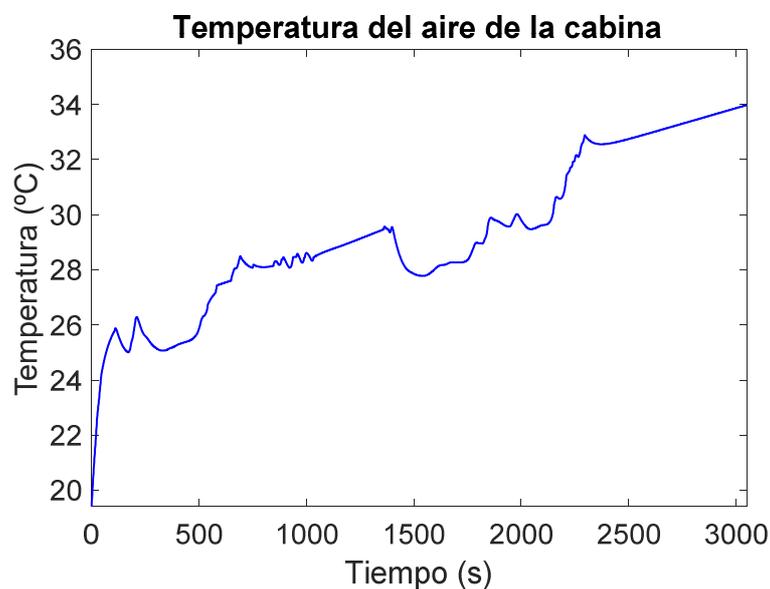


Figura 54. Gráfico de la temperatura interior de la cabina para el estudio de Marrakech (Test 2)

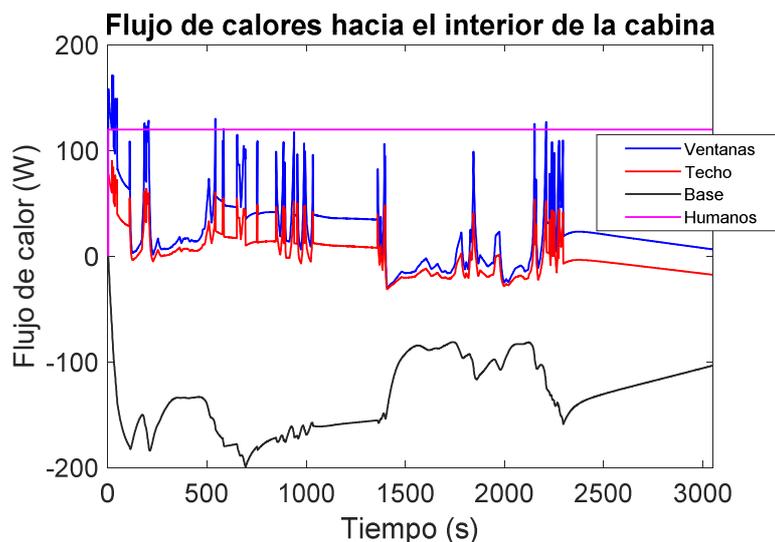


Figura 55. Gráfico de los flujos de calor hacia la cabina de los 4 principales elementos para el estudio de Marrakech (Test 2)

En el gráfico de la temperatura del aire interior de la cabina (Figura 54), se puede observar que la temperatura alcanzada al final del ciclo es mucho más alta que en el test 2 original (34°C frente a 25°C). Esto es debido a que, a diferencia del estudio de León, tanto la temperatura exterior como la irradiancia solar son considerablemente más altas en este estudio que en el test 2. Esto se traduce en mayor calor hacia la cabina y, por tanto, mayor temperatura alcanzada dentro de la misma.

En cuanto a los flujos de calor (Figura 55), los de las ventanas y el techo son positivos (fluctuando entre 0 y 100W, aunque para el caso de las ventanas llega al principio del ciclo hasta los 150W), lo cual quiere decir que está cediendo calor a la cabina. Sin embargo, la base está absorbiendo calor, con valores que van, generalmente, entre los 100W y 200W negativos. Esto se debe a que la cabina está a una temperatura superior que la de la base (por la alta temperatura exterior), y por ello el flujo es en esa dirección.

A continuación, en la Figura 56 y en la Figura 57, se muestran dos gráficos adicionales, en los que se puede observar la diferencia en la evolución de la temperatura interior de la cabina, para el Test 1 y el Test 2, en ambas ciudades (León y Marrakech), teniendo en cuenta sus climatologías totalmente distintas:

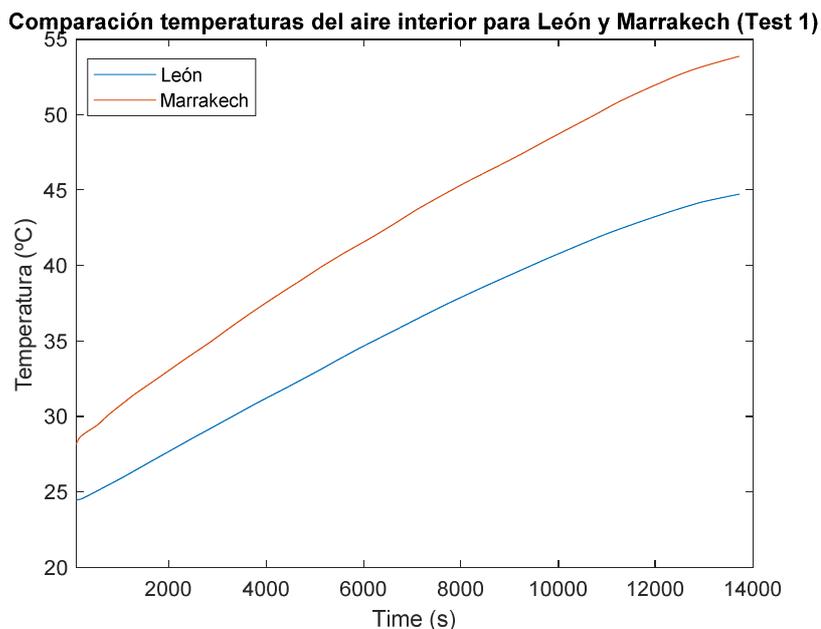


Figura 56. Gráfica de la comparación de las temperaturas del aire de la cabina para ambos estudios (Test 1)

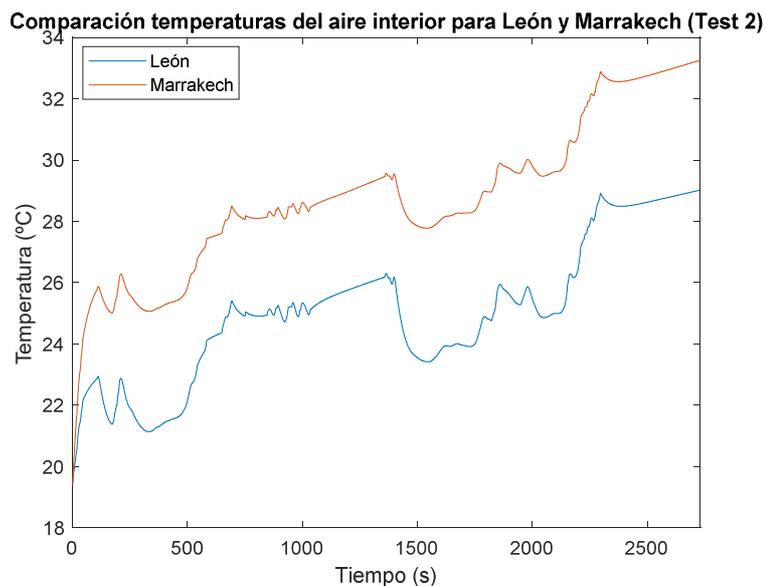


Figura 57. Gráfica de la comparación de las temperaturas del aire de la cabina para ambos estudios (Test 2)

Si se comparan ambos estudios realizados para las condiciones de los dos test, se puede concluir que el perfil de evolución de temperatura es muy parecido para ambos. Esto se debe a que, exceptuando la temperatura exterior y la irradiancia, el resto de condiciones de contorno se mantienen iguales. Es decir, el número de ocupantes y la velocidad del vehículo son iguales, en cada test, para ambas ciudades. Además, aunque los valores de la temperatura exterior y la irradiancia difieren entre León y Marrakech, su evolución se mantiene al alza de manera constante, sin mostrar picos abruptos en ninguno de los casos, como ocurría en los test originales.

Para el caso del test 1, la diferencia de temperaturas de la cabina para ambas ciudades es evidente. Desde los casi 5°C de diferencia a los 2000 segundos de ciclo, hasta los 8°C al final del ensayo. Para el caso del test 2, la diferencia de temperaturas del interior de la cabina se mantiene entre los 3°C y los 4°C durante todo el ensayo. Estas diferencias se deben, principalmente, a la temperatura exterior considerablemente superior de Marrakech frente a la de León, ya que entre las irradiancias de ambas ciudades no existen grandes diferencias (aunque la irradiancia sensiblemente mayor de Marrakech también influye).

6. CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Final de Grado, se ha realizado un estudio del modelo térmico de las cabinas en vehículos. Posteriormente, se ha definido una metodología de modelado numérico de la cabina basada en la bibliografía estudiada de un vehículo híbrido mediante el uso de la herramienta de cálculo numérico Matlab.

Adicionalmente, se ha desarrollado un modelo de cabina capaz de reproducir el comportamiento dinámico de la temperatura del aire interior de la cabina del vehículo en diferentes condiciones ambientales y de funcionamiento del vehículo. Utilizando las referencias bibliográficas se ha validado el modelo térmico de la cabina en dos ciclos de trabajo (o test) con condiciones de contorno diferentes. Los resultados han mostrado que el modelo puede predecir el comportamiento térmico de la cabina con precisión.

Por último, se han realizado tres estudios distintos, variando el número de ocupantes, la irradiancia incidente sobre el vehículo y la temperatura exterior, para poder determinar, sobre el modelo validado, cómo dichas variaciones afectan al comportamiento térmico de la cabina.

Los resultados generales más relevantes han sido que, a mayor temperatura exterior, irradiancia y número de ocupantes en el vehículo, mayor es la temperatura alcanzada en la cabina. Sin embargo, cuanto mayor es la velocidad del vehículo, menor es la temperatura alcanzada en el interior del vehículo.

6.2 DESARROLLO FUTURO

Con la finalidad de mejorar o dar continuidad al trabajo realizado hasta el momento, se propone lo siguiente:

- Realizar mediciones experimentales en un vehículo y, de esta forma, poder validar el modelo con los resultados experimentales obtenidos, en lugar de utilizar únicamente la literatura disponible.
- Realizar otros estudios posteriores utilizando, por ejemplo, distintas velocidades del vehículo, para poder estudiar mejor cómo ésta afecta a la convección exterior del vehículo.
- Aumentar el nivel de discretización, incluyendo más elementos en el modelo de la cabina, teniendo en cuenta las propiedades particulares de los mismos.
- Diseñar un sistema HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning) para el vehículo híbrido que se ajuste perfectamente a las demandas de frío o calor de la cabina, para cada test y estudio realizado, y para posteriores estudios que pudieran realizarse.

7. REFERENCIAS

- [1] D. Marcos, F. J. Pino, C. Bordons, J. J. Guerra. Applied Thermal Engineering: The Development and Validation of a Thermal Model for the Cabin of a Vehicle: Universidad de Sevilla.
- [2] Yan Wang, Qing Gao, Tianshi Zhang, Guohua Wang, Zhipeng Jiang, Yunxia Li. Advances in Integrated Vehicle Thermal Management and Numerical Simulation.
- [3] Iberdrola. Innovación. Baterías de coches eléctricos: <https://www.iberdrola.com/innovacion/baterias-de-coches-electricos>
- [4] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS): <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [5] Weather Spark. El clima típico de cualquier lugar del mundo: <https://es.weatherspark.com/>
- [6] Yan Wang, Qing Gao, Tianshi Zhang, Guohua Wang, Zhipeng Jiang, Yunxia Li. Advances in Integrated Vehicle Thermal Management and Numerical Simulation.
- [7] Ruoyang Yuan, Tom Fletcher, Ahmed Ahmedov, Nikolaos Kalantzis, Antonios Pezouvanis, Nilabza Dutta, Andrew Watson, Kambiz Ebrahimi. Modelling and Co-simulation of Hybrid Vehicles: a Thermal Management Perspective.
- [8] Bárbara Torregrosa-Jaime, Filip Bjurling, José M. Corberán, Fausto Di Sciullo, Jorge Payá. Applied Thermal Engineering: Transient Thermal Model of a Vehicle's Cabin Validated under Variable Ambient Conditions.
- [9] Ivan Cvok, Igor Ratkovic and Josko Deur. Optimisation of Control Input Allocation Maps for Electric Vehicle Heat Pump-based Cabin Heating Systems.
- [10] Pradeep Dinakar and Gautham Rajeeve. Modelling and Simulation of Cooling Systems for BEV High Voltage Battery
- [11] Actualidad motor. Audi Hybrid (II): <https://www.actualidadmotor.com/audi-hybrid-ii-asi-es-el-sistema-hibrido/>
- [12] Toyota. Mantenimiento de la batería de tu coche híbrido: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/2018/mantenimiento-bateria-coche-hibrido-toyota>



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

Autor: Alejandro Vega Álvarez

Tutor: Pablo César Olmeda González

Valencia, junio de 2021

PRESUPUESTO

Los gastos derivados de la realización de este Trabajo Final de Grado se dividen en dos tipos: gastos de personal involucrado en su elaboración, y gastos de material y herramientas utilizadas.

COSTES DE PERSONAL

| Categoría | Dedicación (h) | Coste horario (€/h) | Coste (€) |
|------------------------------|----------------|---------------------|-----------|
| Doctorando | 120 | 40 | 4800 |
| Doctor director del proyecto | 25 | 50 | 1250 |
| Becario estudiante | 300 | 20 | 6000 |
| TOTAL | | | 12050 |

Tabla 1. Costes de personal del proyecto

COSTES DE HERRAMIENTAS

| Categoría | Unidades | Coste (€) |
|---------------------|----------|-----------|
| Ordenador | 1 | 600€ |
| Licencia Office 365 | 1 | 75€ |
| Licencia Matlab | 1 | 69€ |
| TOTAL | | 744€ |

Tabla 2. Costes de herramientas del proyecto

PRESUPUESTO GENERAL

| Categoría | Coste (€) | |
|----------------------------|-----------|----------|
| Costes de personal | 12050 | |
| Costes de herramientas | 744 | |
| SUBTOTAL | | 12794 |
| BENEFICIO INDUSTRIAL (15%) | | 1919.10 |
| TOTAL | | 14713.10 |

Tabla 3. Presupuesto general del proyecto

El presupuesto total de este proyecto asciende a catorce mil setecientos trece euros con diez.