



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN LA CABINA
DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA PREDECIR EL CONSUMO ENERGÉTICO POR AIRE
ACONDICIONADO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

IGNACIO SEBASTIÁN CEBALLOS HERRERA

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

PROFESOR CO-GUÍA:
ALVARO VALENCIA MUSALEM

COMISIÓN:
JORGE REYES MARAMBIO

SANTIAGO DE CHILE
2022

MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN LA CABINA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA PREDECIR EL CONSUMO ENERGÉTICO POR AIRE ACONDICIONADO

En los últimos años, el consumo de energía de parte de transportes particulares se ha elevado sustancialmente. Además el mercado de los vehículos eléctricos es una industria en crecimiento, y el consumo energético de la climatización es el segundo más grande después de la función motriz, pudiendo reducir la autonomía de un vehículo hasta en un 40 % para casos críticos.

Por lo anterior, se justifica la creación de herramientas que permitan gestionar de manera eficiente los recursos de climatización para vehículos eléctricos. Motivado por esta premisa, el siguiente trabajo corresponde a la creación de una herramienta computacional que, mediante la implementación de un modelo transferencia de calor, permita predecir el consumo energético por climatización en un vehículo eléctrico.

El trabajo se realiza utilizando datos proporcionados por el Centro de Energía de la Universidad de Chile, correspondientes a una flota de taxis del vehículo Hyundai Ioniq del años 2019, en donde se midió la velocidad del vehículo, la localización, la fecha, la hora y otros parámetros. Con estos datos es posible realizar el cruzamiento con datos ambientales de radiación directa, radiación difusa y temperatura ambiente, para servir de parámetros de entrada para el modelo.

El modelo térmico creado utiliza el método de balances de calor (*HBM*) para calcular el gasto energético por climatización, considerando efectos de radiación incidente, orientación del vehículo, carga metabólica de los pasajeros, convección externa e interna y conducción a través de las superficies, todo esto utilizando una geometría simplificada del vehículo basada en un volumen de control de aire dentro de la cabina.

El algoritmo creado para implementar el modelo se realiza utilizando el lenguaje de programación *Python 3*, con el objetivo de crear una herramienta para un software de licencia libre. Con dicha herramienta implementada, se analizan tres viajes de los meses de enero, marzo y abril, con duraciones de en promedio 15 minutos y recorridos similares realizados en la región metropolitana.

Los resultados indican un aumento del consumo energético a mayores niveles de radiación, en horas con una posición solar más elevada, y a mayor temperatura ambiente, estableciendo una temperatura deseada de 20 [°C]. Una variación de esta temperatura a 25 y 15 [°C] implica un ahorro del 15 % y un gasto extra del 18 % respectivamente, para el viaje de enero. El consumo por AC se estima como un 24 y 21 % para los viajes de enero y abril respectivamente. El algoritmo logra tiempos de ejecución de aproximadamente 2 [s].

Se propone estudiar un nuevo método para la obtención de temperaturas de cabina, optando por una limitación de consumo por AC. Además, se recomienda buscar la mejora del modelo validando empíricamente sus resultados, y corrigiendo el modelo en sus simplificaciones físicas o mediante un ajuste numérico.

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres, quienes me han apoyado incondicionalmente en todas mis decisiones, y sin quienes yo no estaría aquí. Gracias por hacer todo lo posible para que no me faltara nada, y por compartirme la sabiduría que adquirieron mientras se partían el lomo criando a sus hijos. En particular, muchas gracias a mi mamá, María Teresa, que siempre ha estado ahí con un cafecito y un abrazo. Gracias también a mis hermanos, Richy, Dany y Pauly, quienes estuvieron para darme su consejo, su apoyo y su amistad.

Quiero agradecer también a Inés, mi pareja y compañera, quien me ha dado su cariño y su amistad incondicional desde el día en que nos conocimos. Valoro y aprecio todos los momentos que compartimos juntos, y sin los cuales yo no sería la persona que soy hoy.

Gracias también de todo corazón al Padilla, al Warro y al Ian. Me tomo la libertad de llamarlos de la misma forma en que lo he hecho por más de 15 años, mientras compartimos pichangas, guitarreos, juegos, y sobre todo mucho cariño y fraternidad. Gracias a ustedes sigo aprendiendo como ser un buen amigo y una mejor persona.

Debo agradecer también a mis amigos de bachillerato y la gente del proyecto Eolian. Me han acompañado en la mejor época de mi vida y también la más complicada, y siempre hubo alguien ahí para trabajar, para estudiar, para distraerse, para compartir una conversa que me mejoró el día o darnos apoyo en los tiempos difíciles. Gracias en particular al Cárcamo, Yogo, Corrales, Javier, Tito, Cata y Jorge.

Finalmente, gracias al profesor Williams Calderón por el apoyo dado en esta última etapa de mi carrera, junto a la libertad y confianza que necesité para llegar a esta instancia final. Gracias también por su guía y disposición al profesor Álvaro Valencia y a Jorge Reyes, cuya orientación y consejo fueron cruciales para desarrollar y terminar este trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo principal	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Alcances	4
2. Antecedentes	6
2.1. Fenómenos térmicos involucrados	6
2.1.1. Conducción	7
2.1.2. Convección	7
2.1.3. Radiación	8
2.2. Método de balance de calor (HBM) en vehículos	9
2.3. Carga metabólica (\dot{Q}_{Met})	11
2.4. Ecuaciones solares	11
2.4.1. Radiación solar	12
2.4.2. Posición Solar	12
2.5. Sistemas de aire acondicionado	14
2.5.1. Sistema de enfriamiento	14
2.5.2. Sistema de calefacción	15
2.5.3. Valores y ecuaciones del sistema	16
2.6. Consumo en un vehículo eléctrico	18
3. Metodología	19
4. Modelo desarrollado	22
4.1. Datos y ambiente de programación	22
4.1.1. Datos de viajes	22
4.1.2. Datos ambientales	24
4.1.3. Ambiente de programación del modelo	25
4.2. Geometría del vehículo	26
4.2.1. Modelo del vehículo Hyundai Ioniq	26
4.2.2. Volúmenes del modelo	28
4.2.3. Superficies del modelo	30
4.3. Modelo térmico planteado	32
4.3.1. Entrada de la radiación	32

4.3.2.	Carga convectiva externa	34
4.3.3.	Carga conductiva	35
4.3.4.	Carga convectiva interna	36
4.3.5.	Interacción de cargas térmicas y componentes	38
4.3.6.	Finalización del modelo	39
4.4.	Cálculo de la incidencia solar	43
4.5.	Implementación y resolución	47
4.5.1.	Importación de datos:	48
4.5.2.	Ingreso de condiciones iniciales:	48
4.5.3.	Definición de volúmenes, superficies y materiales:	48
4.5.4.	Definición y cálculo de la incidencia:	49
4.5.5.	Implementación y cálculo de carga metabólica:	49
4.5.6.	Funciones para conducción y convección:	49
4.5.7.	Definición y cálculo de cargas por radiación:	50
4.5.8.	Definición y resolución de funciones para cálculos finales:	50
4.5.9.	Procesamiento y creación de gráficos	52
5.	Resultados	54
5.1.	Resultados para cada viaje	54
5.1.1.	Viaje 20 de enero del 2020	54
5.1.2.	Viaje 05 de marzo del 2020	56
5.1.3.	Viaje 01 de abril del 2020	58
5.2.	Resultados para variación de valores de entrada	59
5.2.1.	Viaje 20 de enero con $t_p = 300$ [s]	60
5.2.2.	Viaje 20 de enero con $t_p = 1200$ [s]	61
5.2.3.	Viaje 20 de enero con $t_{conf} = 15$ [°C]	61
5.2.4.	Viaje 20 de enero con $t_{conf} = 25$ [°C]	62
5.2.5.	Viaje 20 de enero elevando temperaturas iniciales en 5 [°C]	63
5.2.6.	Viaje 20 de enero, simulación de viaje nocturno	63
5.2.7.	Viaje 20 de enero, simulación de viaje frío	64
5.3.	Para comparación con consumo total del vehículo	65
5.4.	Tiempos de ejecución	67
6.	Análisis de resultados	68
6.1.	Análisis de los tres distintos viajes	68
6.2.	Análisis de variación de parámetros	71
6.3.	Análisis sobre la relación con el consumo total del vehículo	75
6.4.	Análisis del tiempo de ejecución	76
7.	Conclusiones	77
	Bibliografía	80
	Anexo A. Tablas de datos ambientales	82
A.1.	Datos 20 de enero de 2020	82
A.2.	Datos 05 de marzo de 2020	83

A.3. Datos 01 de abril de 2020	84
Anexo B. Datos del vehículo Hiunday Ioniq 2019	85
Anexo C. Vistas del polígono del vehículo	86
Anexo D. Dimensiones vehículo <i>BMW</i> 1	87

Índice de Tablas

4.1.	Datos generales de cada viaje.	24
4.2.	Propiedades del aire a 20°C [11].	30
4.3.	Propiedades térmicas y radiativas de los componentes de la cabina [21] [11].	30
4.4.	Propiedades conductivas y radiativas para materiales de distintas superficies.	31
4.5.	Dimensiones y propiedades espaciales para cada superficie.	32
5.1.	Variables de entrada y resultados principales para viaje enero (1), marzo (2) y abril (3).	54
5.2.	Variables de entrada y resultados principales para viaje del 20 de enero en su caso base, variando <i>pull down time</i> , temperaturas de confort, temperaturas iniciales, viaje nocturno y caso de viaje frío (modificaciones de cada caso destacadas).	60
5.3.	Valores estimados para el consumo total del vehículo en cada viaje.	65
5.4.	Consumo térmico por AC y porcentaje de energía del viaje utilizado en AC para distintos valores de COP, en cada tipo de viaje.	66
5.5.	Tiempos de ejecución para cada viaje en su versión original	67
A.1.	Datos ambientales para el día 20 de enero de 2020.	82
A.2.	Datos ambientales para el día 05 de marzo de 2020.	83
A.3.	Datos ambientales para el día 01 de abril de 2020.	84

Índice de Ilustraciones

1.1.	Proyección de principales consumidores de energía a nivel nacional, por sectores de la industria y basados en información del año 2007.	2
1.2.	Comparación en la tasa de motorización para distintas ciudades de Chile.	2
1.3.	Estadísticas de consumo de vehículos eléctricos para el año 2020 a nivel mundial.	3
2.1.	Cabina con geometría simplificada de referencia.	10
2.2.	Tipos de onda agrupados por su longitud de onda (λ)	12
2.3.	Ángulos solares más importantes [14].	13
2.4.	Diagrama de aire acondicionado utilizado por el vehículo [16].	15
2.5.	Modelo del compresor utilizado por el vehículo [18].	16
2.6.	Valores de prueba para distintas partes del sistema de aire acondicionado [19].	17
2.7.	Gráficos que relacionan la velocidad del compresor, los flujos máscicos a la salida del evaporador (\dot{m}_{ea}) y compresor (\dot{m}_{ca}) con la temperatura de salida el evaporador (izquierda) y el COP (derecha); utilizados por Cvok [17].	17
3.1.	Diagrama de la posible metodología de trabajo.	19
4.1.	Criterios fundamentales para elección de viajes.	23
4.2.	Recorrido del viaje del 20 de enero 2020, vehículo V25.	23
4.3.	Recorrido del viaje del 05 de marzo 2020, vehículo V25.	23
4.4.	Recorrido del viaje del 01 de abril 2020, vehículo V25.	24
4.5.	Vehículo eléctrico Hyundai Ioniq del año 2019.	26
4.6.	Cabina del vehículo con geometría simplificada de referencia, desarrollada por Fayazbakhsh [8].	26
4.7.	Modelo 3D del auto Hyundai Ioniq 2019.	27
4.8.	Modelo 3D simplificado del auto Hyundai Ioniq 2019.	27
4.9.	Polígono obtenido en contraste con la cabina.	28
4.10.	Polígono final utilizado para el modelo. Componentes en negro, aire transparente.	28
4.11.	Superficies del vehículo (polígono) rotuladas.	30
4.12.	Cargas térmicas asociadas a cada superficie de S1 a S4.	40
4.13.	Cargas térmicas del modelo general.	41
4.14.	Modelo básico para el cálculo de azimut por cambio de posición.	43
4.15.	Orientación del desplazamiento del vehículo según diferencias de latitudes y longitudes.	44
4.16.	Ángulos definidos para caracterizar azimut según rosa de los vientos (izquierda), y para identificar la dirección de la superficie según orientación del auto (derecha).	45
4.17.	Prueba para cálculo de azimut para viaje del 01 de abril, calculando diferencias de posición entre 2 pasos de tiempo.	46
4.18.	Prueba para cálculo de azimut para viaje del 01 de abril, calculando diferencias de posición entre 6 pasos de tiempo.	47

4.19.	Prueba para cálculo de azimut para viaje del 01 de abril, calculando diferencias de posición entre 10 pasos de tiempo.	47
5.1.	Carga térmica asociada a climatización (AC) para viaje del 20 de enero.	54
5.2.	Velocidad del vehículo para viaje del 20 de enero.	55
5.3.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes para viaje del 20 de enero.	55
5.4.	Temperatura interna de la cabina y temperatura externa e interna del techo para viaje del 20 de enero.	55
5.5.	Cargas térmicas por convección interna asociadas a cada superficie para viaje del 20 de enero.	56
5.6.	Carga térmica asociada a climatización (AC) para viaje del 05 de marzo.	56
5.7.	Velocidad del vehículo para viaje del 05 de marzo.	56
5.8.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes para viaje del 05 de marzo.	57
5.9.	Temperatura interna de la cabina y temperatura externa e interna del techo para viaje del 05 de marzo.	57
5.10.	Cargas térmicas por convección interna asociadas a cada superficie para viaje del 05 de marzo.	57
5.11.	Carga térmica asociada a climatización (AC) para viaje del 01 de abril.	58
5.12.	Velocidad del vehículo para viaje del 01 de abril.	58
5.13.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes para viaje del 01 de abril.	58
5.14.	Temperatura interna de la cabina y temperatura externa e interna del techo para viaje del 01 de abril.	59
5.15.	Cargas térmicas por convección interna asociadas a cada superficie para viaje del 01 de abril.	59
5.16.	Carga térmica asociada a climatización (AC) utilizando $t_p = 300$ [s].	60
5.17.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes utilizando $t_p = 300$ [s].	60
5.18.	Carga térmica asociada a climatización (AC) utilizando $t_p = 1200$ [s].	61
5.19.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes utilizando $t_p = 1200$ [s].	61
5.20.	Carga térmica asociada a climatización (AC) con $t_{conf} = 15$ [°C].	61
5.21.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes con $t_{conf} = 15$ [°C].	62
5.22.	Carga térmica asociada a climatización (AC) con $t_{conf} = 25$ [°C].	62
5.23.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes con $t_{conf} = 25$ [°C].	62
5.24.	Carga térmica asociada a climatización (AC) elevando temperaturas iniciales en 5 [°C].	63
5.25.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes elevando temperaturas iniciales en 5 [°C].	63
5.26.	Carga térmica asociada a climatización (AC) en simulación nocturna.	63
5.27.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes en simulación nocturna (escala ajustada para notar diferencia entre temperatura interna y de los componentes).	64
5.28.	Carga térmica asociada a climatización (AC) en simulación de viaje frío.	64
5.29.	Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes en simulación de viaje frío.	64

5.30.	Consumo neto por carga de aire acondicionado en función de la temperatura ambiente; línea vertical en temperatura de confort.	65
5.31.	Porción gráfica del coeficiente de desempeño obtenida al evaluar valores de prueba para \dot{m}_{ea} y ω_{comp}	66
B.1.	Datos del sistema de refrigeración, velocidades y pesos máximos, entre otros [16].	85
C.1.	Modelo simplificado y polígono creado para el vehículo, vista lateral.	86
C.2.	Modelo simplificado y polígono creado para el vehículo, vista frontal.	86
D.1.	Dimensiones del vehículo de referencia para masa y calor específico de componentes [25]. . .	87

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el cambio climático se ha vuelto un tema cada vez más frecuente tanto a nivel profesional como popular, y no son pocas las investigaciones que muestran como las altas tasas de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) podrían causar efectos importantes en la temperatura del planeta. Según lo evaluado en el *Informe Stern*, realizado por el economista británico Sir Nicholas Stern el año 2006, el nivel de emisiones de GEI ha aumentado de 280 ppm (partículas por millón) a 430 ppm desde la época pre-industrial [1]. Esta tasa de aumento de las emisiones extrapolada al futuro estima que en caso de que no se tomen acciones al respecto, el año 2050 se llegaría a un nivel de emisiones de hasta 550 ppm, lo que implicaría un aumento de la temperatura del planeta de aproximadamente 2°C. Más aún, según datos registrados por la NASA [2], la temperatura del planeta ha experimentado un aumento constante desde la década de los 1970, registrándose en el año 2019, una temperatura promedio 0,95°C mayor al promedio del siglo XX.

En otra línea, el informe elaborado por Stern también expone que las consecuencias de este cambio climático no serían solamente ecológicas, sino que también económicas. Su estimación dice que de cumplirse sus predicciones, se podría perder el 20 % del PIB (producto interno bruto) mundial de forma anual e indefinida en el tiempo debido a este aumento de temperatura [1]. Adicionalmente, sus estimaciones indican que una inversión de entre el 1 y 2 % del PIB mundial generado anualmente, podría frenar esta crisis económica y ambiental, lo que delega una importante tarea a líderes, empresarios, investigadores y otros profesionales a nivel global.

Ahora bien, el nivel de emisiones varía en distintos sectores de la industria, y aunque cualquier disminución de emisiones es favorable, es importante poner énfasis en dichos sectores para contrarrestar de manera más eficaz el aumento en el nivel de emisiones. Según estudios internacionales enfocados en Chile [3], la industria energética fue responsable de aproximadamente el 78 % de las emisiones de GEI producidas el año 2016 a nivel nacional, y la tendencia de los últimos años indica que este porcentaje irá en aumento. Más específicamente, el sector de transporte nacional utilizaba al año 2007 [4] cerca del 38 % del recurso energético nacional, y se espera, según proyecciones, que para el año 2030, este porcentaje supere el 50 %, tal como se muestra en el gráfico mostrado a continuación.

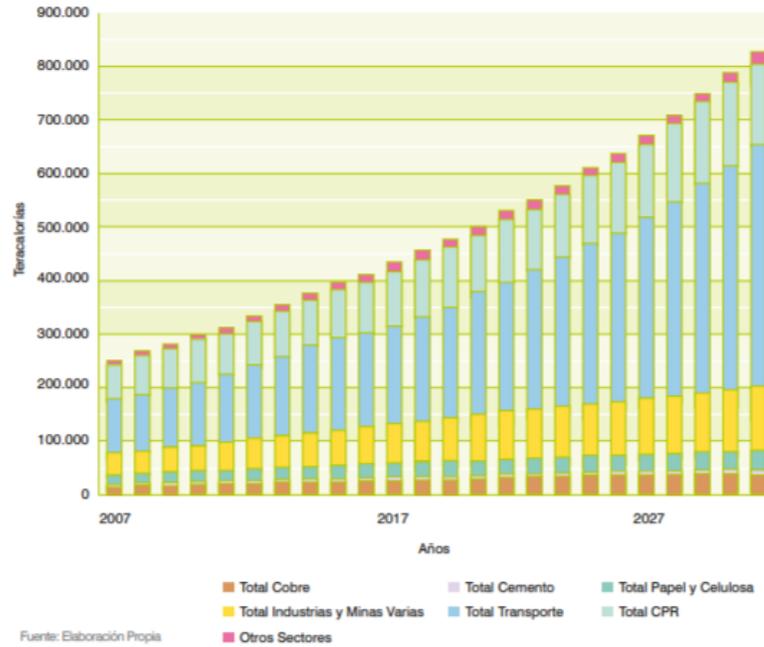


Figura 1.1: Proyección de principales consumidores de energía a nivel nacional, por sectores de la industria y basados en información del año 2007.

1.1. Motivación

El sector de transporte ha crecido de manera importante en los últimos años, más aún en el sector privado. Según cifras del informe del Ministerio de transporte expuestas en su reporte 2010-2015 [5], la motorización ha llegado a un nivel de 3,65 persona por cada vehículo en circulación. Esta cifra va acompañada de un aumento significativo de la motorización no solo a nivel metropolitano, sino que nivel país, tal como lo muestra la Figura 1.2.

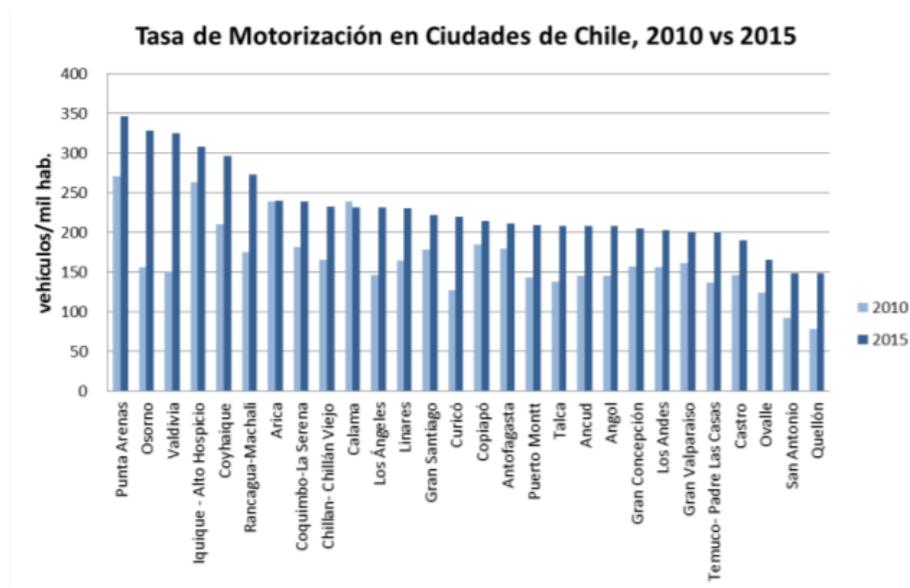


Figura 1.2: Comparación en la tasa de motorización para distintas ciudades de Chile.

Considerando el nivel de contaminación emitido por el sector energético, la relevancia del transporte en el uso de esta energía, y la masividad del uso de vehículo particulares livianos, se hace relevante el estudio de la gestión de los recursos energéticos utilizados en este sector, y surge como necesidad solucionar los principales problemas que puedan limitar la optimización de estos.

Por otro lado, el vehículo ha cambiado en los últimos años su paradigma convencional, y la idea de autos eléctricos desarrollada hace ya un par de décadas, a tomado fuerza en la industria comercial automotriz. Países con un mayor nivel desarrollo económico como Noruega, Islandia y Suecia alcanzan las mayores cifras de proporción entre ventas anuales de vehículos eléctricos o híbridos (EV y HEV) y vehículos de combustión interna (vehículos ICE) (Figura 1.3) [6].

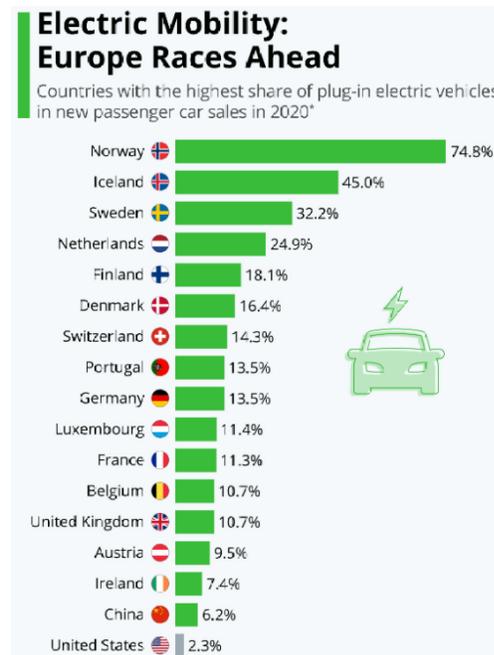


Figura 1.3: Estadísticas de consumo de vehículos eléctricos para el año 2020 a nivel mundial.

Con todo lo anterior, y debido a la búsqueda constante de iniciativas independientes de combustibles fósiles, surge la necesidad de estudiar desde ya las principales características energéticas en EV y HEV, y cuales son sus principales características, limitaciones y aspectos mejorables. Investigaciones muestran que el consumo energético en vehículos eléctricos es liderado por dos aspectos [7]: el uso de motores para el desplazamiento del vehículo, y en segundo lugar el consumo por climatización y/o aire acondicionado. Además, otros estudios muestran que dicho consumo ronda un 12 % de la energía del auto en un uso común del aire acondicionado, y que en caso de usos críticos, puede llegar a reducir la autonomía del vehículo hasta en un 40 %.

Incorporando esta información al hecho de que el cambio climático produce un aumento continuo de la temperatura del planeta, se deduce que habrá un aumento en el uso de este recurso, y por esto mismo es importante generar estrategias que permitan mejorar su gestión bajo distintas condiciones de operación. La estrategia escogida para desarrollar en esta investigación corresponde a la creación de un modelo computacional, el cual debe incorporar los fenómenos elementales para obtener una predicción del comportamiento térmico de la cabina del vehículo, y que permitirá utilizar esta información para mejorar la gestión y el fun-

cionamiento de las tecnologías de aire acondicionado y/o climatización.

Este tipo de modelos son comunes en la industria ingenieril, pero usualmente requieren el uso de softwares de modelamiento de fenómenos térmicos como lo son *Ansys*, *Comsol*, entre otros. La desventaja de estos programas es su accesibilidad, debido a que su uso legal solo está permitido en versiones estudiantiles limitadas computacionalmente, o bien bajo pago de licencias, lo que representa de inmediato una barrera de entrada al uso de estas tecnologías, y por ende, a estrategias de gestión como las mencionadas anteriormente. Es por esto, que se añade como limitación a la elaboración de este modelo, el uso únicamente de programas de licencia libre, con el objetivo de otorgar un acceso universal a estas herramientas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

Desarrollar una herramienta computacional que permita, por medio de un modelo de transferencia de calor, estimar el consumo energético por climatización en un vehículo eléctrico.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar la herramienta utilizando un software de licencia libre, propiciando su accesibilidad.
- La herramienta debe ser capaz de generar datos de consumo por climatización al ingresar datos externos de temperatura ambiente, radiación solar, localización, velocidad del vehículo y sus características geométricas.
- La herramienta debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a cualquier vehículo tipo sedan de hasta 5 puertas.
- Desarrollar el balance térmico del vehículo considerando efectos de radiación incidente, conducción y convección.
- Procesar y analizar tres viajes distintos de un mismo vehículo en distintos meses del año, utilizando tanto datos ambientales como del viaje en particular.
- Analizar el comportamiento del modelo tras variar sus parámetros y condiciones iniciales.
- Concebir una estimación del porcentaje de consumo por climatización frente al de todo el vehículo durante el viaje.

1.3. Alcances

El modelo térmico se prueba utilizando los datos de una flota de vehículos, proporcionados por el Centro de Energía de la Universidad de Chile. Bajo este contexto, el modelo debe ser capaz de generar su predicción de consumo utilizando información del viaje correspondiente a la velocidad del vehículo, fecha, hora latitud y longitud para un número de mediciones.

Los datos ambientales como radiaciones y temperaturas son anexados al modelo de forma externa gracias a datos históricos de la Dirección Aeronáutica Nacional y el Explorador Solar. Tanto estos datos como los datos de viaje deben ser previamente manipulados para dejarlos en el formato apropiado. El modelo se ejecutará correctamente sólo al tener los datos en este formato.

Se analizarán 3 viajes de todo el conjunto de datos proporcionados. Luego se selecciona sólo uno de ellos para realizar el análisis de configuración de parámetros de entrada. Esto corresponde a variar temperaturas iniciales, temperatura de confort, tiempo de estabilización del sistema, y la simulación de un caso nocturno y uno con calefacción.

El nivel de precisión de radiaciones corresponde a datos de cada hora de un día característico para el día específico del viaje. En caso de que se pueda acceder a datos de mayor precisión, debe modificarse parte del código para poder ajustar el procesamiento de datos.

El modelo permite el cambio de condiciones iniciales de temperatura, temperatura de confort y temperatura de respuesta del sistema (t_p). Al mismo tiempo, permite integrarle información sobre cantidad de pasajeros, su altura y su peso.

El modelo se realiza con una geometría poligonal que se aproxima para el vehículo *Hyundai Ioniq* del año 2019. El carácter de este polígono permite al modelo flexibilizar su uso a cualquier vehículo tipo sedan de hasta 5 puertas que pueda adaptarse a las características morfológicas del polígono. Sin embargo, las dimensiones de este pueden ser variadas con facilidad para adaptarse a un nuevo vehículo.

Los espesores de superficies y materiales se basan en datos encontrados en la bibliografía para vehículos similares. Estos pueden variarse con cierta flexibilidad en el modelo, mientras se mantengan cuatro superficies de un material para ventanas y una superficie para el techo con tres capas de materiales. Las propiedades físicas y térmicas de los materiales son consideradas constantes para todo el viaje e independientes de la temperatura, basadas en la bibliografía.

Los análisis para viajes futuros quedan sujetos a suministrar todas las características mencionadas anteriormente, sumado a suponer un escenario de temperaturas ambientales y radiaciones solares.

No se realizan análisis de costos, y la comparación con consumo real está limitada a valores de operación buscados en la bibliografía y relaciones simplificadas para el consumo total del vehículo. El análisis del sistema de aire acondicionado en particular tampoco es estudiado en este trabajo.

La herramienta computacional permite ejecutar el cálculo de consumo para un nivel de cientos de datos temporales en una ventana de segundos, por lo que queda sujeto a trabajos futuros su implementación en tiempo real. Sin embargo, la rapidez de ejecución dependerá del hardware y software de procesamiento.

El modelo puede ejecutarse utilizando el software *Python* en lenguaje *Python 3*, y su funcionamiento dependerá de contar con las librerías y módulos indicados más adelante en este trabajo.

Alcances específicos del modelo térmico, supuestos y simplificaciones sobre los fenómenos físicos son detallados en el capítulo 4 *Modelo Desarrollado*.

Capítulo 2

Antecedentes

El estudio de fenómenos térmicos requiere en primer lugar conocer la naturaleza de los elementos en juego, a fin de realizar supuestos pertinentes a los fenómenos del problema. Para estudiar el sistema térmico de la cabina [8], es usual considerar todo el aire al interior de esta como un sistema generalizado, es decir, como un único elemento al cual se le aplican diversas cargas térmicas dependientes de los fenómenos externos e internos del este sistema.

Partiendo del concepto de sistema generalizado, se tienen dos opciones para estudiar el fenómeno: *Heath balance method* (HBM) y *Weighting factor method* (WFM). Según lo investigado por Kamar, Senawi y Kamsa [9], el método WFM resulta más fácil de implementar que el método HBM. Sin embargo, HBM es científicamente más riguroso y puede incorporar una mayor cantidad de detalles sin perder tanta precisión en simplificaciones. Además el método HBM ha sido implementado en casos similares anteriormente, y por más de un autor [8], por lo que la revisión bibliográfica resulta más variada, entregando más posibilidades de casos de estudio a incorporar y/o analizar.

Respecto al aspecto temporal de los fenómenos involucrados, el análisis se realizará para un caso pseudo-estacionario, en donde se supone que el sistema ya ha alcanzado su equilibrio térmico cada ciertos intervalos de tiempo. Para esto, será necesario definir un paso de tiempo adecuado, y además, puede incorporarse la existencia de un elemento dependiente del tiempo [10] para otorgar al sistema este retraso en su equilibrio de forma artificial.

Ahora bien, antes de comenzar con la especificaciones de la variables en juego para un sistema HBM, es necesario generar un marco teórico básico sobre los fenómenos que están involucrados en este tipo de sistemas.

2.1. Fenómenos térmicos involucrados

Al analizar un sistema térmico como el de la cabina, existen tres fenómenos térmicos básicos que estarán presentes en todo momento, en mayor o menor medida. Es importante además destacar que el estudio al corresponder a uno del tipo pseudo-estacionario, las variables térmicas existentes no serán dependientes del tiempo.

2.1.1. Conducción

Fenómeno por el cual dos cuerpos en contacto son capaces de transferir energía entre ellos sin la necesidad de un transporte másico involucrado. La magnitud de este intercambio dependerá de la diferencia de temperatura entre ellos y de la conductividad térmica de los cuerpos, y puede ocurrir en más de una dirección a la vez para un mismo cuerpo. Sin embargo, la expresión unidimensional básica de este fenómeno es la que se ve a continuación:

$$\dot{q}_x = k \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Donde:

- \dot{q}_x : potencia calórica transferida en la dirección en cuestión [W/m²]
- k : conductividad térmica del material [W/K m]
- ΔT : diferencia de temperatura entre cuerpos [°C]
- Δx : distancia entre punto inicial y final de la transferencia estudiada, perpendicular a la superficie por la que se transfiere el calor [m]

2.1.2. Convección

La convección se refiere a la transferencia de energía que ocurre entre un fluido y un cuerpo en contacto con él (sólido o fluido). En este caso, al ocurrir un aumento de la temperatura del fluido este cambia también su densidad, generando un movimiento en sí mismo, que permite que nuevas partículas de fluido interactúen con el cuerpo en cuestión. Dependiendo de si el movimiento del fluido es generado solo por el fenómeno, o si existe algún agente externo que impone una velocidad sobre él, esta convección puede clasificarse en natural o forzada respectivamente.

$$\dot{q}_x = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Donde:

- \dot{q}_x : potencia calórica convectiva [W/m²]
- h : coeficiente convectivo del fenómeno particular [W/m² K]
- T_s : temperatura superficial de cuerpo [K]
- T_∞ : temperatura del fluido suficientemente lejos de la interacción con el cuerpo [K]

En general la diferencia entre la convección natural y forzada está dada por la forma en que se calcula el coeficiente convectivo h . Para ello existen distintas correlaciones con mayor o menor grado de precisión, y que dependen de un mayor o menor número de variables. Un problema puede simplificarse o complicarse solo por la forma en que se escoja calcular este coeficiente.

Para efectos de convección natural, las correlaciones utilizadas involucran números adimensionales que intentan caracterizar la física del fenómeno, tales como [11]:

- **Número de Nusselt (Nu):** Caracteriza como aumenta la transferencia de calor debido al desplazamiento de un fluido en comparación con los efectos conductivos que tendría si este no se moviese.
- **Número de Prandtl (Pr):** Relaciona variables de conducción y convección, sirve para determinar cual es el fenómeno dominante en un intercambio de calor.
- **Número de Grashof (Gr):** Caracteriza un fenómeno relacionando las fuerzas de flotación con las fuerzas viscosas, determinando así cual de los dos fenómenos domina la física del contexto dado.
- **Número de Rayleigh (Ra):** Al igual que el numero de Prandtl, relaciona los efectos convectivos con los conductivos en una expresión. Sin embargo, por su naturaleza matemática, también incluye fenómenos viscosos y de flotabilidad, ya que se escribe como el producto de Pr y Gr .

2.1.3. Radiación

La radiación térmica corresponde a un tipo de transferencia de calor en la cual los cuerpos no requieren estar en contacto, ya que se realiza a través de ondas electromagnéticas, las que pueden viajar incluso a través del vacío. Esta forma de transferencia de calor no requiere de diferencias de temperatura entre los cuerpos, ya que la radiación es emitida en todas direcciones por los cuerpos siempre que tengan una temperatura superior a 0 [K].

Una primera aproximación simplista del fenómeno de radiación, se logra a través de la ecuación mostrada a continuación, en donde se supone que el cuerpo que emite la radiación es perfectamente opaco, por lo que su emisión de radiación es máxima al igual que su absorción.

$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

Donde:

- \dot{q} : potencia calórica emitida como radiación electromagnética [W/m²]
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann [W/m² K⁴]
- T : temperatura del cuerpo emisor [K]

En todo cuerpo impactado por radiación, la radiación incidente se comporta de tres maneras distintas. Parte de la radiación es absorbida por el cuerpo, otra parte es reflejada y la última parte es transmitida a través del cuerpo. Cabe destacar que la parte transmitida puede ser nula para muchos cuerpos. Cada una de las partes de la radiación incidente puede entonces escribirse de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{absorbida} = \dot{Q}_{radiacion} \cdot \alpha \quad (2.4)$$

$$\dot{Q}_{transmitida} = \dot{Q}_{radiacion} \cdot \tau \quad (2.5)$$

$$\dot{Q}_{reflejada} = \dot{Q}_{radiacion} \cdot \rho \quad (2.6)$$

Donde:

- $\dot{Q}_{radiacion}$: Potencia de radiación total incidente por unidad de área [W/m²]
- $\dot{Q}_{absorbida}$: Fracción absorbida de la potencia de radiación total por unidad de área [W/m²]
- $\dot{Q}_{transmitida}$: Fracción transmitida de la potencia de radiación total por unidad de área [W/m²]
- $\dot{Q}_{reflejada}$: Fracción reflejada de la potencia de radiación total por unidad de área [W/m²]
- α : coeficiente de absortividad
- τ : coeficiente de transmitividad
- ρ : coeficiente de reflectividad

De la igualdad en (2.7), se deduce la propiedad mostrada en (2.8). Esta igualdad debe cumplirse para todo material, independiente de las variaciones que presenten los valores de α , τ y ρ , y bastará conocer dos de las constantes para obtener la tercera.

$$\dot{Q}_{radiacion} = \dot{Q}_{absorbida} + \dot{Q}_{reflejada} + \dot{Q}_{transmitida} \quad (2.7)$$

$$1 = \alpha + \tau + \rho \quad (2.8)$$

Es importante destacar que los valores de α , τ y ρ dependerán tanto del material como de la temperatura del cuerpo emisor, y que por lo tanto, para un mismo material estos valores serán distintos para radiación proveniente del sol y radiación de cuerpos a temperatura ambiente [11].

2.2. Método de balance de calor (HBM) en vehículos

El método de balance de calor se basa en definir un volumen de control como elemento unificado, en el cual se cumplen dos condiciones: las propiedades físicas del material o medio se consideran invariables espacialmente dentro del volumen; las variables físicas como temperatura, velocidad, o presión tienen un valor uniforme en todo el volumen de control. Luego, se realiza un balance térmico (eventualmente podría agregarse un balance másico) sobre el volumen de control, el que será afectado por distintas cargas térmicas modulares, sujeto a la inercia térmica del propio volumen.

La aproximación anterior no es completamente fiel con lo ocurrido en la cabina de un vehículo, en donde según investigaciones, la variación de temperatura entre los puntos más críticos puede llegar a los 7°C. Sin embargo, modelos anteriores desarrollados han comprobado ser una buena aproximación desde la validación empírica [8]. Además, el desarrollo de métodos computacionales más complejos requiere un mayor costo computacional de procesamiento, un estudio más detallado del vehículo en cuestión y por lo tanto una menor flexibilidad del modelo, y una adquisición de valores de entrada para el sistema de mayor número y tasa de muestreo, lo que involucra otro costo adicional.

Por otro lado, estudiar la dinámica del aire al interior de la cabina requiere un enfoque más detallista basado también en la posición de entradas y salidas de aire, características del sistema de aire acondicionado en cuestión, estudio de fugas másicas del sistema, entre otros. Si bien estudiar los fenómenos anteriores

podría ser interesante, no se corresponde con el nivel de datos disponibles para el desarrollo del modelo, y tiene que ver más con un proceso de diseño de la ventilación del vehículo que con un modelo general.

Una gran ventaja del método *HBM* es poder trabajar con cargas térmicas individuales, es decir, se aísla cada uno de los fenómenos térmicos ocurridos en la cabina y luego el equilibrio térmico se encarga de interrelacionarlos. Esto permite generar un análisis generalizado del problema, en donde cada carga puede analizarse por separado, y por ende su grado de precisión puede ser estudiado o mejorado individualmente sin necesidad de intervenir el planteamiento del problema. Este aspecto también es muy relevante si se toma el trabajo de este informe como un punto de partida para un modelo térmico de la cabina, el cual puede ser refinado poniendo énfasis en cada carga térmica en particular, facilitando el desarrollo futuro de mejores predicciones.

Según Fayazbakhsh y sus predecesores en *HBM* para vehículos, el estudio del problema conlleva una carga total compuesta de diversas cargas modulares, en donde se incluyen efectos de radiación, convección, conducción, ventilación, metabolismo de los ocupantes y calor generado por motores y otros sistemas al interior del auto. La Ecuación 2.9 presenta las cargas mencionadas anteriormente [8] [12], y en la Figura 2.1 se muestra un esquema de las distintas cargas térmicas que inciden en el vehículo según Fayazbakhsh.

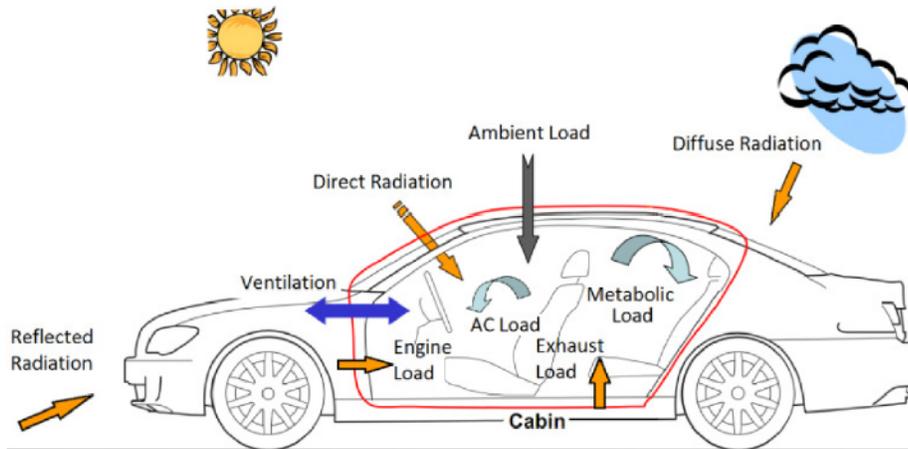


Figura 2.1: Cabina con geometría simplificada de referencia.

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{Met} + \dot{Q}_{Dir} + \dot{Q}_{Dif} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{Exh} + \dot{Q}_{Eng} + \dot{Q}_{Ven} + \dot{Q}_{AC} \quad (2.9)$$

Donde:

- \dot{Q}_{Met} : Tasa de generación de calor metabólica [W]
- \dot{Q}_{Dir} : Potencia térmica de la radiación directa incidente [W]
- \dot{Q}_{Dif} : Potencia térmica de la radiación difusa incidente [W]
- \dot{Q}_{Amb} : Potencia térmica producto de interacción con el ambiente, que resume los efectos conductivos y convectivos con el exterior [W]
- \dot{Q}_{Exh} : Potencia térmica extraída de los gases de la combustión, válida para vehículos combustión [W]

- \dot{Q}_{Eng} : Potencia térmica que proviene del motor, relevante para autos de combustión [W]
- \dot{Q}_{Ven} : Potencia térmica que se pierde por fugas de aire y ventilación de la cabina, dada principalmente por el intercambio de aire [W]
- \dot{Q}_{Met} : Potencia utilizada del sistema de aire acondicionado, con el objetivo de llegar a la temperatura de confort o mantenerla [W]

Si bien la ecuación anterior es la base de los modelos térmicos para vehículos tanto eléctricos como a combustión interna (híbridos incluidos), solo se consideran las variables involucradas como referencia de los fenómenos elementales involucrados en el problema. El modelo térmico a desarrollar tendrá sus diferencias con los revisados en la bibliografía por motivos que se verán más adelante.

2.3. Carga metabólica (\dot{Q}_{Met})

La carga metabólica como carga modular, ha sido estudiada y estandarizada por la institución *Fundamental American Society of Heating*, y por este motivo la descripción matemática de esta carga se mantendrá fiel a lo indicado en [10] y no contempla mayor desarrollo. La carga metabólica corresponde a la carga térmica proveniente del calor emitido por seres vivos, y depende del número de pasajeros en el vehículo. La expresión utilizada se basa en una correlación de la masa y la altura de la persona para estimar la cantidad de energía emitida, tal como se ve a continuación:

$$\dot{Q}_{Met} = \sum_{Pasajeros} M \cdot A_{Du} \quad (2.10)$$

$$A_{Du} = 0,202W^{0,425} \cdot H^{0,725} \quad (2.11)$$

Donde:

- M : Tasa de generación de calor de cada individuo, tabulada como 85 [W/m²] para el conductor y 55 [W/m²] para un pasajero
- A_{Du} : Área de *Duboi*, área superficial de la persona [m²]
- H : Altura de la persona [m]
- W : Peso de la persona [Kg]

2.4. Ecuaciones solares

Para estudiar el comportamiento de la radiación solar que incide sobre el vehículo, es necesario conocer la posición solar y las variables de las que esta depende. En general, la posición del sol depende de la hora, el día del año, la latitud y longitud. Sin embargo, también es necesario conocer datos de la superficie tales como su orientación cardinal y su inclinación.

2.4.1. Radiación solar

El sol emite radiación en una amplia gama de longitudes de onda en todas direcciones hacia el espacio. Estas ondas no necesitan de un medio para transportarse y por lo tanto pueden viajar por el espacio hasta interactuar con la superficie terrestre. De acuerdo al comportamiento de las ondas, estas pueden penetrar o no en la atmósfera terrestre dependiendo de su longitud de onda, y las que son capaces de ingresar son refractadas variando su ángulo de incidencia.

Detallando un poco más este último punto, la radiación solar comprende radiaciones en varias longitudes de onda, específicamente entre los 10^{-2} y 10^2 [nm]. En este rango se encuentra la radiación ultra violeta, la radiación visible y la radiación infrarroja, rangos en los que se encuentra también la radiación térmica (Figura 2.2). A pesar de que el comportamiento físico de cada uno de estos rangos es distinto al enfrentarse a la atmósfera y/o otros materiales, matemáticamente puede simplificarse el problema estableciendo que toda la radiación solar incidente se comporta de igual manera, o al menos se divide en dos grupos distintos [11]:

- **Radiación directa:** Radiación que sometida a fenómenos de reflexión y refracción, procede directamente del sol, y que por ende tendrá la capacidad de ser absorbida, transmitida y reflejada de acuerdo con las propiedades del material de la superficie y el sol como cuerpo emisor. Además, esta radiación al tener un carácter vectorial incide sobre las superficies dependiendo de su posición y orientación en relación al sol.
- **Radiación difusa:** Radiación que si bien tiene como origen primitivo el sol, corresponde a la emitida por todos los cuerpos de aire terrestres, o elementos presentes en la atmósfera. Las propiedades mencionadas anteriormente estarán dadas por el material de la superficie receptora y un cuerpo emisor a temperatura similar al ambiente, a veces también llamada temperatura de cielo [11].

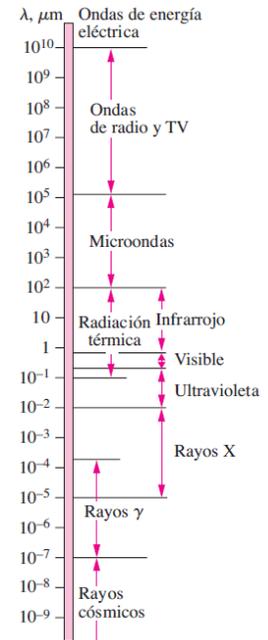


Figura 2.2: Tipos de onda agrupados por su longitud de onda (λ)

Si bien existen ecuaciones para estimar la magnitud de la radiación en una localización en específico basadas en la geometría terrestre, se cuenta con registros medidos empíricamente que entregan por separado los niveles de radiación difusa y directa para cada hora y fecha del año. Los registros usados para este informe serán los del *Explorador solar*, herramienta desarrollada por el Ministerio de Energía de Chile, y que cuenta con un banco de datos de radiaciones, temperaturas, nubosidad, índices de sombra, entre otros. Estos valores pueden obtenerse para una fecha dada hasta el año 2016, o bien para el día típico más representativo del comportamiento de los datos a través de los años *TMY (Typical Meteorological Year)*.

2.4.2. Posición Solar

Si bien la radiación solar será un dato de entrada para el modelo, dependiendo de la superficie del vehículo evaluada, la radiación directa tendrá una ponderación distinta debido a sus inclinaciones y orientaciones.

Por esto, es necesario conocer la posición del sol al menos con precisión de una hora, y así obtener un factor de ponderación ajustado a cada momento del viaje a analizar.

Para estudiar adecuadamente la posición del sol, es necesario conocer sus variables más importantes, listadas a continuación [13]. Además es posible ver en la Figura 3.1 la representación gráfica de los ángulos solares más importantes: la altitud y el azimut.

- **Azimut (γ):** Corresponde al ángulo entre la proyección del sol sobre el plano horizontal y el meridiano de la ubicación. Por convención varía entre los $(-180^\circ; 180^\circ)$, donde 0° es la dirección sur y 180° la norte.
- **Altura solar o Altitud (α_s):** Es el ángulo formado entre la horizontal y la línea que une al observador con el sol.
- **Zenit:** Corresponde al complemento del ángulo de altura solar, o dicho de otra forma, el ángulo entre la vertical y una línea trazada entre el observador y el sol.
- **Pendiente o slope (β):** Ángulo entre la superficie a estudiar y el plano horizontal. Superficies curvas suelen representarse con una superficie plana equivalente.
- **Declinación (δ):** Representa el momento del año en el que se está, tomando valores positivos desde marzo a septiembre y negativos el resto del año. Varía entre $(-23,45^\circ; 23,45^\circ)$.
- **Ángulo horario (ω):** Es el ángulo entre el meridiano del lugar y la proyección del sol sobre el ecuador celeste. Varía 15° por hora y toma valores positivos por la tarde y negativos en la mañana.
- **Latitud: (ϕ)** Corresponde a la latitud geográfica del lugar, variando de 0° a 90° y tomando valores negativos en el hemisferio sur y positivos en el hemisferio norte.
- **Ángulo de incidencia (Θ):** Corresponde al ángulo que caracteriza la interacción de una superficie dada con el sol, y es una composición de las demás variables. En la Ecuación 2.12 puede verse su relación matemática con el resto de los ángulos, de lo que se desprende su dependencia de la latitud, la pendiente de la superficie en cuestión, la declinación dada por el mes del año, el azimut dado por la orientación de la superficie y el ángulo horario.

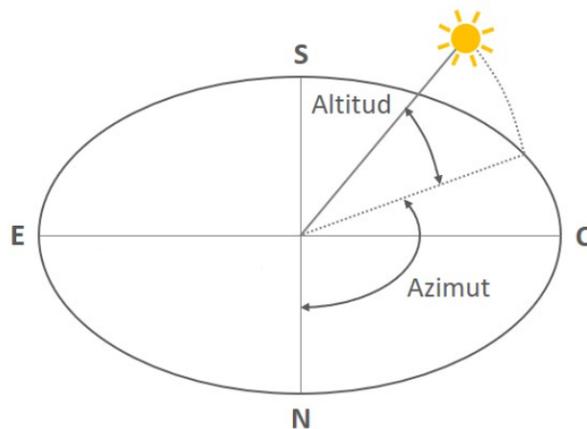


Figura 2.3: Ángulos solares más importantes [14].

$$\begin{aligned}
\cos(\Theta) = & \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \cos(\beta) - \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\
& + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) \\
& + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(\omega)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

2.5. Sistemas de aire acondicionado

Para dimensionar el impacto del consumo energético de un sistema de calefacción y aire acondicionado, es necesario conocer al menos de manera básica como es que éste opera. En general, este sistema en vehículos eléctricos es similar al de vehículos de combustión interna, pudiéndose separar en dos partes principales: el sistema de enfriamiento, y por otro lado el sistema de calefacción. El funcionamiento de cada uno y las diferencias entre estos sistemas en vehículos eléctricos y de combustión son abordadas continuación.

2.5.1. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento, también llamado usualmente sistema de aire acondicionado, corresponde a un conjunto de equipos que permiten enfriar una masa de aire. En su versión más básica, estos sistemas cuentan con: un compresor, un evaporador, un condensador y una válvula de expansión.

También es importante tener en cuenta que estos sistemas en general utilizan un fluido de trabajo conocido como refrigerante, es decir, un fluido cuyas propiedades térmicas permiten cambiar su temperatura a menor flujo de calor entregado, volviendo los sistemas de refrigeración menos costosos energéticamente. Refrigerantes comunes son el R134a, el R744 [15] y el R123yf, este último más reciente, menos nocivo para el ozono, pero aún no masificado debido a su inflamabilidad.

En la Figura 2.4 se muestra el sistema de aire acondicionado presente en el manual de taller del vehículo *Hiunday Ioniq 2019*, y sus partes son descritas de manera general a continuación:

- **Compresor:** Corresponde a un equipo cuya principal función es comprimir el refrigerante, elevando tanto su presión como su temperatura. La alimentación energética del compresor puede estar asociada a la combustión del vehículo (solo vehículos de combustión interna), o bien, puede ser mediante corriente eléctrica, y corresponde a la de mayor magnitud dentro del sistema.
- **Condensador:** En esta parte, el refrigerante pasa a través de un intercambiador de calor que le permite bajar su temperatura eliminando calor con la ayuda de un ventilador, convirtiendo el vapor de alta presión y temperatura a un fluido de menor temperatura. El ventilador suele funcionar gracias a corriente eléctrica, y su consumo energético se considera muchas veces despreciable en comparación al del compresor.
- **Recibidor secador:** Este dispositivo no corresponde a un elemento fundamental del sistema de enfriamiento, pero se incorpora como un recipiente que permite el suministro de refrigerante al resto del sistema garantizando su pureza. De esta forma, también se asegura la llegada de refrigerante en estado líquido a la válvula de expansión.

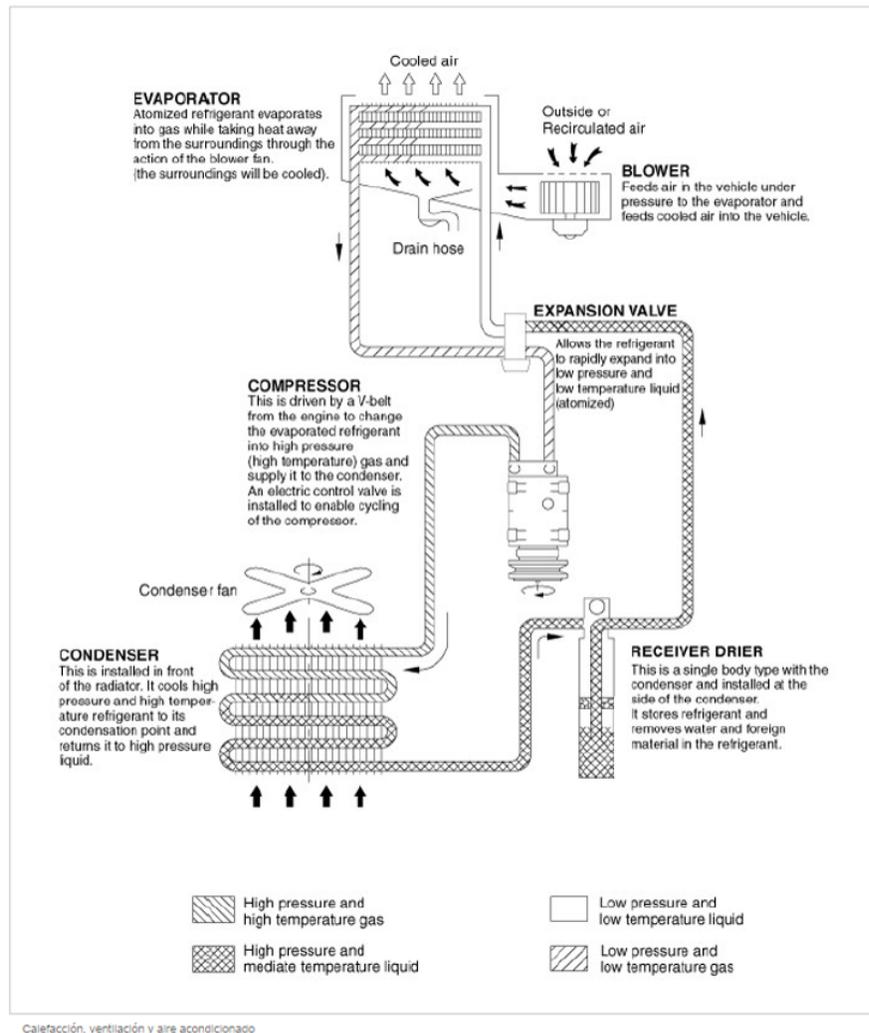


Figura 2.4: Diagrama de aire acondicionado utilizado por el vehículo [16].

- **Válvula de expansión:** Libera la presión del refrigerante, convirtiéndolo en un fluido de baja temperatura y baja presión.
- **Evaporador:** El evaporador corresponde a un intercambiador de calor en donde el refrigerante, enfriado y a baja presión, interactúa térmicamente con el aire para poder enfriarlo. Este aire es enfriado y enviado a la cabina, y el refrigerante es evaporado, listo para volver al compresor y repetir el ciclo. En este lugar, suele haber ventiladores al igual que en el condensador, y su consumo energético se considera también despreciable en comparación al del compresor (a modo de simplificación matemática).

2.5.2. Sistema de calefacción

El sistema de calefacción obedece una lógica más simple en términos de funcionamiento. Se basa básicamente en generar una fuente de calor para calentar aire, el que es impulsado por medio de un ventilador. Sin embargo, la forma de calentar ese aire varía de manera importante de vehículos a combustión a vehículos eléctricos.

En vehículos de combustión, el motor representa una fuente de calor constante que pueda ser utilizada para calentar el aire que entrará a la cabina. Gracias a esto, calentar aire no presenta un desafío importante ni tampoco un gran gasto energético en un vehículo a combustión, ya que su consumo queda reducido al consumo energético de ventiladores para la impulsión del aire.

En vehículos eléctricos, ya falta de una fuente de calor tan importante como la de un motor a combustión, la fuente de calor queda dada por dispositivos de índole eléctrica para elevar la temperatura del aire. Sin embargo, diversas estrategias para aprovechar el calor residual de motores y baterías se han generado [15], pero estas deben lidiar con el hecho de añadir subsistemas adicionales para aprovechar el calor del aire extraído, básicamente por el riesgo que implica el usar aire que pueda estar contaminado con gases residuales del banco de baterías o los motores del vehículo.

2.5.3. Valores y ecuaciones del sistema

Como se dijo anteriormente, el sistema de refrigeración de aire contiene varios componentes, pero el más significativo de ellos en términos de consumo corresponde al compresor. Sin embargo, este consumo está dado, entre otras cosas, por el rango termodinámico en el que está inscrito el ciclo de refrigeración, lo que incorpora en la práctica valores como diferencias de temperatura y presiones, flujos máscicos y eficiencias de los equipos utilizados. Al no tener gran parte de estos datos reales para el sistema de refrigeración, y no conocer siquiera la naturaleza del sistema de calefacción, se establecerán relaciones basadas en el trabajo de Cvok [17], lo mencionado en [8] y el tipo de compresor utilizado por el sistema de refrigeración.



Figura 2.5: Modelo del compresor utilizado por el vehículo [18].

La Figura 2.5 muestra el modelo del compresor utilizado para el sistema de refrigeración, según lo especificado en el manual de taller. Luego, la Figura 2.6 muestra valores de pruebas hechas el año 2019 en compresores *Hanon* (y otras parte del sistema) destinados a vehículos Kia y Hyundai, por lo que se asumen estos valores como rangos de uso altos pero válidos para el compresor del vehículo.

A summary of the test conditions run during standard bench testing procedure:

Test Name	Ambient Temp. [° C]	Compressor Speed [RPM]	Condenser		Evaporator				Target Air Temp. Downstream of Evap. [° C]
			Temp. [° C]	Face Velocity [m/s]	Temp. [° C]	Humidity [%]	Mass Flow [kg/min]	Simulated Air Selection	
I70	45	900	70	1.5	35	25	9.0	RECIRC	3
I60	45	900	60	1.5	35	25	9.0	RECIRC	3
I45	45	900	45	1.5	35	25	9.0	RECIRC	3
L45	45	1800	45	2.0	35	25	9.0	RECIRC	3
M45	45	2500	45	3.0	35	25	9.0	RECIRC	3
H45	45	4000	45	4.0	35	25	9.0	RECIRC	3
I50a	35	900	50	1.5	35	40	9.0	OSA	3
I35a	35	900	35	1.5	35	40	9.0	OSA	3
L35a	35	1800	35	2.0	35	40	9.0	OSA	3
M35a	35	2500	35	3.0	35	40	9.0	OSA	3
H35a	35	4000	35	4.0	35	40	9.0	OSA	3
I40a	25	900	40	1.5	25	80	6.5	OSA	3 / 10
I25a	25	900	25	1.5	25	80	6.5	OSA	3 / 10
L25a	25	1800	25	2.0	25	80	6.5	OSA	3 / 10
M25a	25	2500	25	3.0	25	80	6.5	OSA	3 / 10
H25a	25	4000	25	4.0	25	80	6.5	OSA	3 / 10
I40c	25	900	40	1.5	25	50	6.5	OSA	3 / 10
I25c	25	900	25	1.5	25	50	6.5	OSA	3 / 10
L25c	25	1800	25	2.0	25	50	6.5	OSA	3 / 10
M25c	25	2500	25	3.0	25	50	6.5	OSA	3 / 10
H25c	25	4000	25	4.0	25	50	6.5	OSA	3 / 10
I30	15	900	30	1.5	15	80	6.5	OSA	3 / 10
I15	15	900	15	1.5	15	80	6.5	OSA	3 / 10
L15	15	1800	15	2.0	15	80	6.5	OSA	3 / 10
M15	15	2500	15	3.0	15	80	6.5	OSA	3 / 10
H15	15	4000	15	4.0	15	80	6.5	OSA	3 / 10

Figura 2.6: Valores de prueba para distintas partes del sistema de aire acondicionado [19].

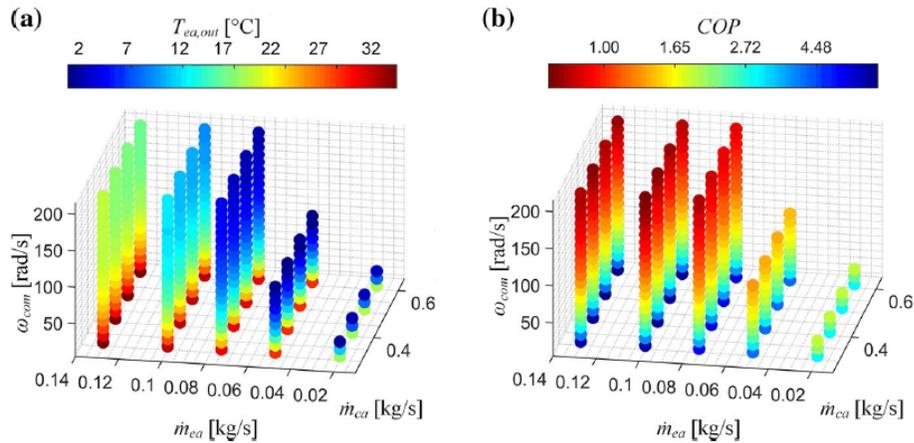


Figura 2.7: Gráficos que relacionan la velocidad del compresor, los flujos máscicos a la salida del evaporador (\dot{m}_{ea}) y compresor (\dot{m}_{ca}) con la temperatura de salida el evaporador (izquierda) y el COP (derecha); utilizados por Cvok [17].

Según lo comentado por Johnson [20], los valores de consumo de un vehículo híbrido en aire acondicionado están en el rango desde los 500 a los 4000 [W]. Además expresa que este consumo en el mismo tipo de vehículo puede incrementar el consumo total del vehículo a un 128%, lo que implica que el sistema de aire acondicionado se lleva un 21% del consumo del vehículo.

Por otro lado, según expresó [8], el consumo en un vehículo de tamaño medio ronda el 12% del consumo energético total del vehículo. Usando estos valores de referencia, se espera un consumo energético de entre el 10% y el 25%. Sin embargo, el valor de trabajo ingresado a un sistema de refrigeración o calefacción no es el mismo que se tiene como calor de extracción o suministro. Existe por ende una relación numérica entre

el trabajo y el calor en cuestión, conocida como COP.

Se sabe que el coeficiente de desempeño (COP) de un refrigerador o enfriador, puede ser representado como la relación mostrada en la Ecuación 2.13, en donde básicamente se entiende su desempeño como la cantidad de calor que es capaz de sacar el sistema desde el volumen de control deseado, en relación a la energía necesaria para hacerlo. Esta relación puede entender de forma similar para un sistema de calefacción, en donde se reemplaza el calor que es capaz de sacar del sistema, por el calor que es capaz de suministrar (Ecuación 2.14).

$$COP_R = \frac{Q_R}{W_{comp}} \quad (2.13)$$

$$COP_C = \frac{Q_C}{W_{cal}} \quad (2.14)$$

Donde:

- COP_R : Coeficiente de desempeño de un sistema de refrigeración
- COP_C : Coeficiente de desempeño de un sistema de calefacción
- Q_R : Calor de refrigeración extraído del sistema [J]
- Q_C : Calor de calefacción suministrado al sistema [J]
- W_{comp} : Trabajo que se le suministra al compresor [J]
- W_{cal} : Trabajo que se le suministra al calefactor [J], usualmente ligado a a la energía entregada al componente disipador

2.6. Consumo en un vehículo eléctrico

Para comparar con los valores dados por los referentes, es necesario tener algún grado de conocimiento sobre el consumo total del vehículo. En este caso, es posible estimar la energía utilizada en el viaje realizando una comparación de los estados de carga del banco de baterías en el comienzo y el final del viaje. Se asume de esta forma un proceso de descarga lineal de la batería. Luego, la expresión para la energía consumida por el vehículo en un viaje queda:

$$E_{viaje} = C_B \cdot (SOC_f - SOC_i) \quad (2.15)$$

Donde:

- E_{viaje} : Energía total consumida en el viaje [J] o [kWh]
- SOC_i : Estado de carga inicial de la batería
- SOC_f : Estado de carga final de la batería
- C_B : Capacidad de carga total de la batería, que para el caso de este vehículo es 28 [kWh]

Capítulo 3

Metodología

Para cumplir tantos los objetivos principales como secundarios de este informe, es necesario definir una ruta que permita desempeñar cada tarea de forma adecuada. Para esto, se deben primero conocer las distintas líneas que involucran al trabajo y cómo interactúan entre ellas. Sólo luego de esto es posible establecer una metodología de trabajo dependiendo de la necesidad de ciertas tareas cumplidas o del tiempo que toma en desarrollar cada una de ellas. En la imagen siguiente se muestra un diagrama de las tareas que permiten el desarrollo del modelo.

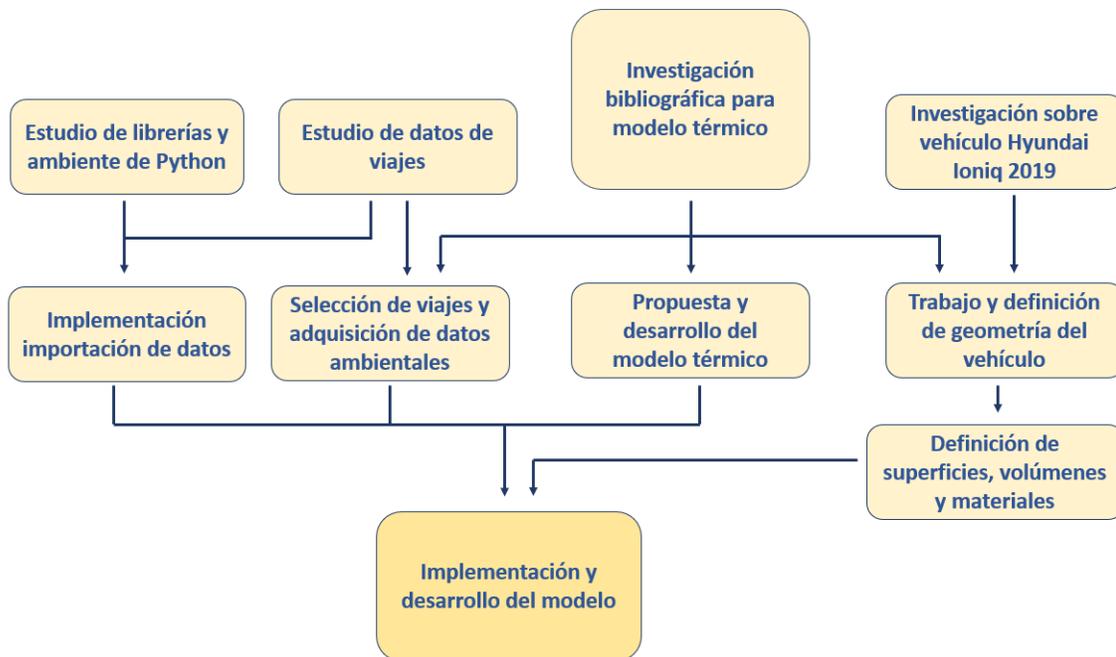


Figura 3.1: Diagrama de la posible metodología de trabajo.

Sin embargo, por motivos prácticos las tareas planteadas deben ser abordadas de una en una con el objetivo de mantener un orden, independiente de la posibilidad de realizar algunas de ellas en paralelo. A continuación se presenta la ruta seguida para la confección de este modelo:

1. Investigación bibliográfica:

Corresponde a la primera etapa del proceso y permite conocer la factibilidad de la solución buscada. En este caso en particular, se solicitó al estudiante realizar un modelo térmico capaz de predecir el

consumo energético por climatización de un vehículo eléctrico. Por ende, esta primera etapa conlleva la búsqueda de referentes y la identificación de los demás aspectos principales.

Cabe destacar que si bien esta etapa se contempla para un principio, es una tarea que se extiende a lo largo de todo el trabajo realizado, buscando referentes o información para alimentar el modelo, o resolver las distintas situaciones que puedan surgir.

2. Estudio de datos de viajes:

Esta segunda etapa nace en paralelo a la continuación de la investigación bibliográfica. Son proporcionados los datos disponibles para el estudio, con lo que se identifica la cantidad de datos a analizar, la naturaleza del formato de los datos y las variables que este contiene. Esto es de vital importancia para plantear los alcances del trabajo, en función de la información que se dispone.

3. Estudio de librerías y ambiente de Python:

Una vez conocidos los fenómenos físicos básicos que contempla el problema y el formato de trabajo utilizado por otros referentes, y habiendo planteado el objetivo de utilizar un software licencia libre, se comienza el estudio del lenguaje *Python* y las distintas librerías que permiten el tratamiento de datos adecuado. Se destacan librerías asociadas a agrupación de datos e iterables, funciones matemáticas y conversión de formatos para la adquisición de datos.

4. Investigación sobre Vehículo Hyundai Ioniq 2019 y geometría:

Esta etapa comienza en paralelo al estudio de los datos disponibles para cada viaje, ya que junto con esto se adjunta la información de la flota de vehículos que sirvieron para su adquisición.

Debido a que la investigación bibliográfica y los alcances del proyecto apuntan a un tratamiento de los fenómenos físicos y no al sistema de aire acondicionado en particular, la búsqueda de datos sobre el vehículo se concentra en las dimensiones principales del vehículo y/o algún archivo del modelado 3D.

Una vez conseguido el modelo 3D del vehículo, se trabaja hasta obtener una geometría con el detalle suficiente para definir el polígono a usar en el problema. Esto se realiza utilizando el software *Inventor 2020* para modelamiento 3D.

5. Propuesta y desarrollo del modelo térmico:

Esta etapa comienza en realidad en paralelo a la investigación bibliográfica, definiendo variables y realizando supuestos físicos que permitiesen plantear el problema, buscando la factibilidad de su resolución. Se contempla aquí la búsqueda de ecuaciones que permitan en conjunto dar solución al problema, tomando elementos usados por referentes y desarrollando los propios.

Es importante para esta etapa tener claras las variables de entrada de las que se dispone en los datos de los viajes. Definir un modelo básico en concreto implica conocer que datos serán incógnitas.

Gracias al uso de cargas modulares para un volumen de control, pueden desarrollarse, hasta cierto punto, de forma independiente algunas de las cargas térmicas en sus distintas complejidades.

6. Selección de viajes, datos ambientales e implementación:

Se realiza la búsqueda de viajes idóneos para el procesamiento, basándose en la completitud y la calidad de sus datos (esto se detalla en el capítulo siguiente). Junto a esto, se realiza la búsqueda de datos ambientales para los días donde se producen los viajes.

Se define la forma de adquisición de los datos al modelo una vez conocida la naturaleza de estos, tanto de los viajes como ambientales. Los datos ambientales se obtienen de repositorios con datos históricos como La Dirección Aeronáutica Nacional y el Explorador Solar.

Definición de superficies, volúmenes y materiales:

Habiendo obtenido el modelo 3D del vehículo y teniendo más detalles sobre el modelo térmico, se definen superficies y volúmenes del problema. Este proceso se entrelaza con el desarrollo del modelo debido a que la subdivisión de la cabina y sus componentes tiene directa relación con este. Al mismo tiempo, se realiza la búsqueda bibliográfica que permite definir materiales, propiedades físicas y otras características de cada superficie y/o volumen.

Implementación y desarrollo del modelo:

Con todo lo anterior definido, el trabajo restante corresponde a implementar el modelo térmico planteado, así como también a probar distintas mejoras desde el punto de vista de la transferencia de calor del modelo o del algoritmo utilizado. El detalle de funcionamiento del algoritmo se explica en el capítulo 4.5.

Producción y análisis de resultados :

Una vez concebido el algoritmo que permite predecir el consumo por climatización, se realiza la búsqueda de variables significativas a analizar, así como la producción de datos de resultados para cada uno de los tres viajes. Para estudiar el comportamiento del modelo ante la variación de algunos parámetros, se producen datos para un mismo viaje en distintas configuraciones.

Capítulo 4

Modelo desarrollado

4.1. Datos y ambiente de programación

4.1.1. Datos de viajes

Para comenzar con el modelo es necesario tener claros los datos con los que se cuenta, y por ende qué valores de entrada será posible usar. Para comenzar, los datos de entrada se encuentran en formato *.mat*, archivos que es posible abrir en el software *MATLAB*. La matriz de datos contiene un gran número de columnas con datos tanto de fecha, hora, latitud, longitud, temperatura, velocidad, y datos del consumo energético del auto relacionados con cada una de sus unidades del banco de baterías. Todos estos datos son adquiridos cada 5 [s].

En particular, no se cuenta con datos del consumo de la unidad de aire acondicionado o de la unidad de electrónica, y por lo mismo, no es posible realizar una comparación con el consumo real del AC en el vehículo. Sin embargo, el modelo en su flexibilidad estará operativo para realizar estudios futuros en los que se tenga la posibilidad de realizar todas las mediciones pertinentes.

Los datos disponibles involucran las mediciones realizadas en una flota de taxis el año 2020, desde el mes de enero hasta julio, considerando 26 unidades distintas del vehículo Hyundai Ioniq del año 2019, en su versión eléctrica. Los datos disponibles, sin embargo, varían bastante de auto a auto, por lo que, para efectos de este modelo, se utilizarán solo viajes realizados por el vehículo con ID V25, el cual tiene el mayor número de viajes realizados.

Es importante también destacar que el concepto de viaje es una definición laxa, por lo que se considera un viaje individual a un recorrido cuya partida se efectúa luego de mínimo 15 minutos de estar detenido. Bajo esta premisa, se seleccionan tres viajes similares en recorrido, pero de distintas épocas del año, buscando tener variabilidad en los factores ambientales. Además, se buscaron viajes que de preferencia ocurrieran durante las horas de radiación.

Para la elección final, también se consideró importante que los datos estuvieran completos en las columnas relevantes, es decir, que no faltaran datos de velocidad, ni de latitud ni de longitud. Un resumen de los criterios utilizados puede verse en la Figura 4.4. Utilizando esos criterios se escogen los viajes mostrados adelante.



Figura 4.1: Criterios fundamentales para elección de viajes.

- **20 de enero del 2020:** Este viaje se realiza en el rango horario de 17:00 a las 18:00 horas, desde la comuna de Maipú a la zona de noviciado en la región metropolitana, tiene una duración de 18 minutos, una velocidad media de 37 [km/h] y distancia de viaje de 10,34 [km].

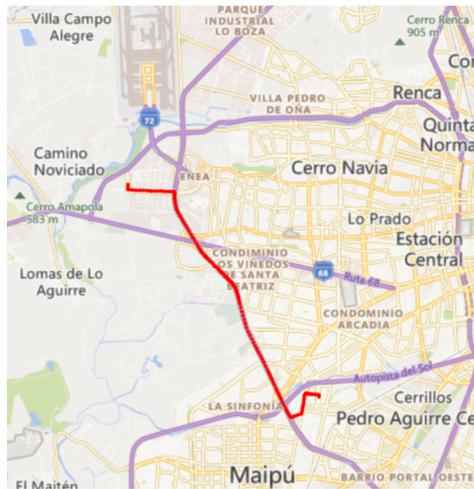


Figura 4.2: Recorrido del viaje del 20 de enero 2020, vehículo V25.

- **05 de marzo del 2020:** Este viaje se realiza en el rango horario de las 16:00 horas, desde la comuna de Maipú a la zona de noviciado en la región metropolitana, tiene una duración de 14 minutos, una velocidad media de 53 [km/h] y distancia de viaje de 12,81 [km].

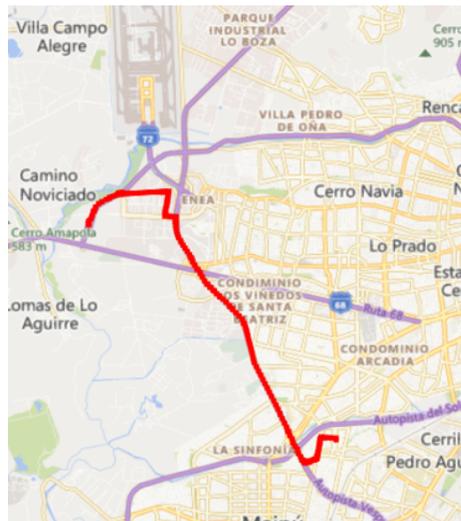


Figura 4.3: Recorrido del viaje del 05 de marzo 2020, vehículo V25.

- **01 de abril del 2020:** Este viaje se realiza a entre las 17:00 y las 18:00 horas, desde la comuna de Maipú a la zona de noviciado en la región metropolitana, tiene una duración de 15 minutos, una velocidad media de 50 [km/h] y distancia de viaje 13,01 [km].

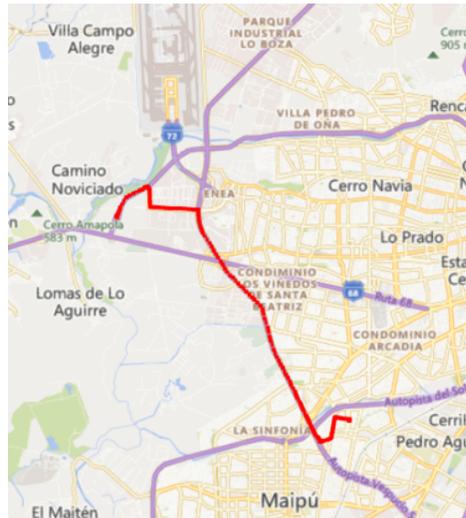


Figura 4.4: Recorrido del viaje del 01 de abril 2020, vehículo V25.

La adquisición de los datos al programa *Spyder* que utiliza lenguaje *Python 3*, se realiza importando archivos en formato *.csv* (*coma separated values*), fáciles de manipular tanto utilizando *Excel* o *Bloc de notas*. El formato corresponde a los datos separados por comas en columnas de respectivamente: día, mes, año, hora, velocidad, temperatura ambiente, longitud y latitud. La temperatura ambiente externa al vehículo es acoplada a los datos del viaje, ya que esta tiene un valor diferente para cada minuto y es importante sincronizarla con la hora exacta del viaje y así lograr una buena correlación. El origen de esta mediación de temperatura se explica en la siguiente sección.

Tabla 4.1: Datos generales de cada viaje.

Viajes	Hora inicio [hrs]	Hora fin [hrs]	Duración [min]	Velocidad media [km/h]	Distancia recorrida [km]
20 de enero	17:46:19	18:04:04	18	37	10,94
05 de marzo	16:09:09	16:23:44	14	53	12,81
01 de abril	17:54:49	18:09:54	15	50	13,01

4.1.2. Datos ambientales

Los datos ambientales ingresados al modelo tendrán dos orígenes distintos. La temperatura ambiente viene de los datos de la Dirección aeronáutica nacional, lo que permite obtener una precisión del minuto con datos del día exacto en el que ocurrió el viaje. Sin embargo, con el objetivo de tener datos de radiación directa y difusa por separado, se utilizan las radiaciones disponibles en la herramienta del *Explorador Solar* del ministerio de energía. Estos datos se originan tomados en distintas estaciones e interpolados para cubrir todo el terreno nacional, por lo que se utilizan los datos de la comuna de Maipú, en donde comienza el viaje.

Las desventaja de estos últimos datos es que no tienen fechas del años 2020 en su banco de datos, por lo que utilizan los datos TMY (*Typical meteorological year*), los que para cada mes del año, utilizan el mes

más representativo del historial de datos. En la sección 8.1 de anexos, se muestran las tablas de los valores usados para cada viaje, las que incluyen además valores de temperatura ambiente (por hora) velocidad del viento, nubosidad y sombra provenientes del explorador solar, solo para el caso en que se considere necesario utilizar esta información.

En términos de formato, los datos ambientales son ingresado al modelo en una archivo `.csv` por las mismas razones expuestas anteriormente, en columnas con los siguientes datos: radiación directa, radiación difusa, temperatura ambiente, velocidad del viento, sombras y nubosidad.

4.1.3. Ambiente de programación del modelo

Uno de los alcances de este trabajo es crear un modelo de acceso libre, es decir, cuyo software de desarrollo y acceso futuro no este sujeto a un pago ni una licencia, generando una herramienta de fácil acceso. Existen actualmente modelos creados en *MATLAB* utilizando la herramienta *Simulink*, pero este programa no cumple la ventaja de ser gratuito, por lo que se descarta como opción.

Un lenguaje de programación bastante accesible es *Python*, que puede utilizarse en diversos ambientes de programación tales como *Visual Studio Code*, *GitHub*, *Jupyter*, *Spyder*, entre otros editores de texto. En este caso se utilizará la herramienta *Spyder* que utiliza el lenguaje *Python 3*, más que nada por que permite visualizar variables y gráficos en un formato cómodo similar al que ofrece *Matlab*.

Otra ventaja de *Python* es que permite añadir e importar módulos y librerías de forma gratuita. Estas librerías son variadas y permiten trabajar con distintos tipos de datos y herramientas. Las librerías a usar para desarrollar este modelo son:

- **Numpy:** Posee variadas herramientas numéricas y de trato de datos. Es un librería muy utilizada y para efectos de este código de vital importancia, ya que incorpora elementos iterables llamados *arrays* que se usan a lo largo de todo el modelo. La ventaja de estos elementos es que permite realizar operaciones matemáticas entre ellos de manera fácil gracias a funciones integradas en la librería, sin la necesidad de crear bucles ni iteraciones como en el caso de las listas de *Python*.
- **Pandas:** Es especial para tratamiento de datos y cambios de formato de estos. Se le da uso por sus herramientas para importar archivos del tipo `.csv`, y a pesar de que no es tan utilizada en el modelo como Numpy, sin esta librería no sería posible crear un modelo flexible para ingresar datos externos. Además incluye los llamadas *Dataframes* y *Series* de Pandas, iterables similares a listas o los *arrays* de Numpy.
- **Matplotlib:** Librería que contiene múltiples funciones para obtener gráficos, basada en las funciones que contiene *MATLAB*. Se utiliza para realizar el post proceso de los datos obtenidos.
- **Os:** Librería que permite trabajar con carpetas y directorios (carpeta de trabajo del código). Tiene utilidad para rastrear errores de directorio y corregirlos, o bien cambiar el directorio para orientar al modelo a cargar archivos específicos. Su uso no es esencial pero resulta más cómodo que cambiar archivos de lugar cada vez que se quiera correr un código distinto.
- **Math:** Contiene funciones matemáticas básicas como trigonométricas, logaritmos, entre otros. Este es el uso que se le da a lo largo del modelo, y en ocasiones muy precisas.

- **Date:** Librería que permite trabajar con formatos de fecha, estos últimos usualmente generados de forma automática en la telemetría o adquisición de datos. También permite establecer funciones respecto a la hora real, con lo que es posible establecer el tiempo que demora en ejecutarse el modelo.
- **Collections:** Contiene funciones de soporte que no se utilizan directamente en el modelo, pero útiles para el trabajo con datos e iterables, tales como conteos, agrupaciones, herramientas para listas, diccionarios, etc.

4.2. Geometría del vehículo

4.2.1. Modelo del vehículo Hyundai Ioniq

Si bien el modelo térmico tendrá una flexibilidad que le permita adaptarse a distintos modelos de auto, es necesario utilizar información real del vehículo usado para realizar las mediciones. Este vehículo corresponde al *Hyundai Ioniq* del año 2019, en su versión eléctrica, un vehículo de 5 puertas con 4,47 [m] de largo, 1,820 [m] de ancho y 1,475 [m] de alto. Más especificaciones para este modelo pueden encontrarse en Anexo B, y puede verse una imagen del vehículo en la siguiente imagen.



Figura 4.5: Vehículo eléctrico Hyundai Ioniq del año 2019.

Al ser un modelo enfocado en analizar cargas térmicas modulares por cada superficie, es necesario generar estas superficies planas que sean representativas de las superficies reales del auto, tal como lo realizó Fayazbakhsh para su modelo [8], y como muestra la imagen a continuación.

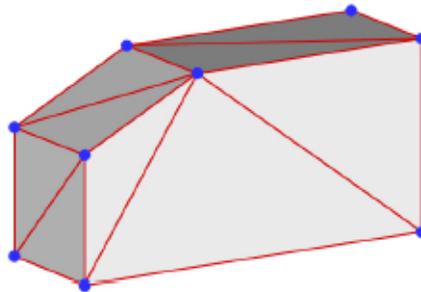


Figura 4.6: Cabina del vehículo con geometría simplificada de referencia, desarrollada por Fayazbakhsh [8].

Para tener el modelo de la cabina simplificado, primero es necesario conocer la geometría del vehículo original, o al menos sus dimensiones. Se halló en la web el modelo 3D del vehículo en formato *.stl*, el que proporciona con gran detalle toda la geometría del vehículo tanto externa como interna con gran nivel de detalle. Usando el software *Inventor* del año 2020 de la empresa *Autodesk*, se transforma el archivo a un formato más genérico para trabajar en modelamiento 3D con un archivo *.stp*.

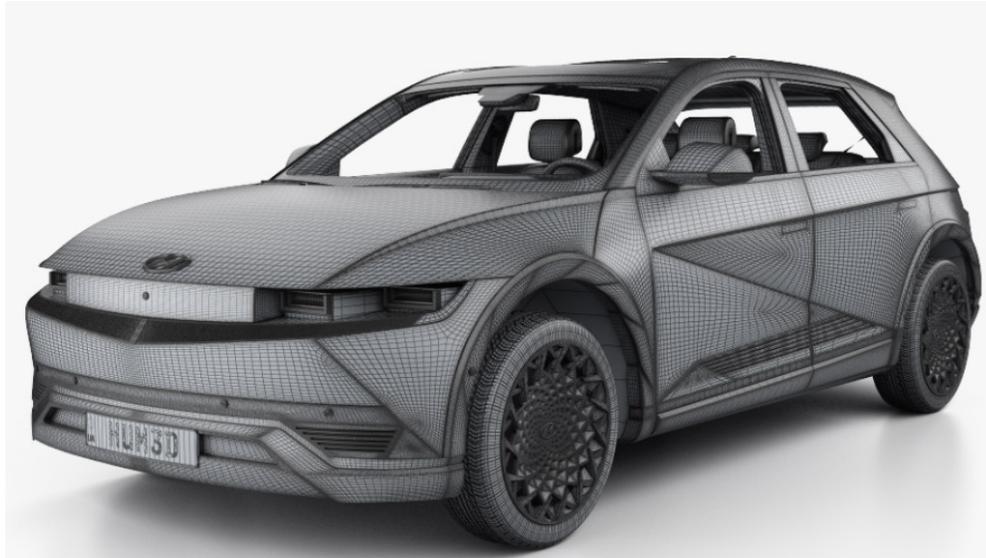


Figura 4.7: Modelo 3D del auto Hyundai Ioniq 2019.

A pesar de que el modelo presenta una gran calidad en cuanto a detalle, el número de sólidos y piezas del archivo es bastante grande, del orden de los 5000 elementos. Esta gran cantidad de elementos distintos hace difícil trabajar el modelo debido al gran costo computacional que tiene trabajar con un archivo tan grande, por lo que se simplifican algunas superficies, uniendo varios de los elementos. Luego de esto y haciendo el archivo más pequeño para poder trabajarlo, se exportan solamente los elementos principales del auto que permitirán definir los volúmenes y superficies necesarias para el modelo, dejando el modelo de la siguiente forma:

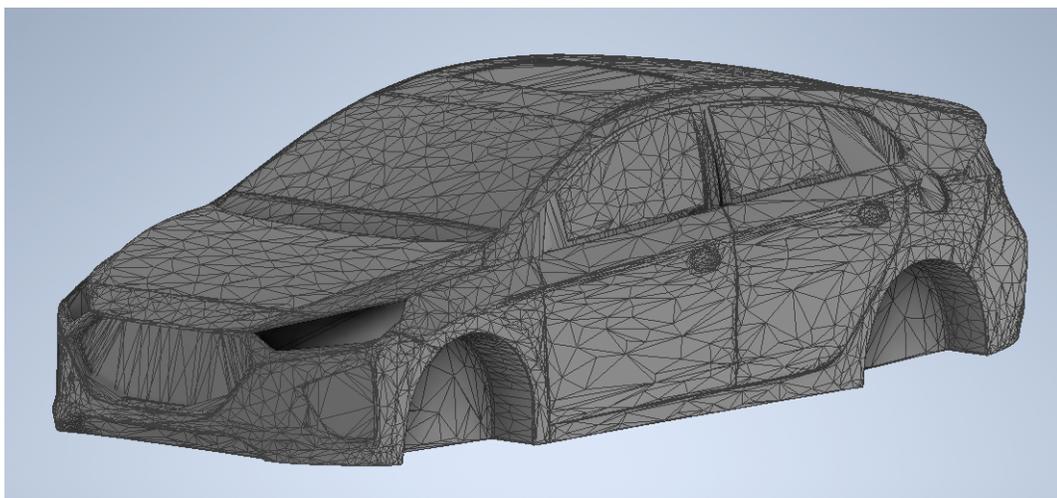


Figura 4.8: Modelo 3D simplificado del auto Hyundai Ioniq 2019.

Luego de tener el modelo simplificado en el formato y tamaño adecuado para trabajar, debe crearse un

polígono tal como en la Figura 4.6. Para realizar esto, se trabajó en torno a la superficies reales del vehículo, intentando considerar tanto las áreas como los ángulos de las superficies de manera fidedigna, manteniendo baja la cantidad de superficies, y por supuesto, estableciéndolas como superficies planas. De este proceso se obtiene el polígono a utilizar para los volúmenes y superficies del vehículo, el cual solo considera el espacio de la cabina usado por los ocupantes, tal como se ve en la Figura 4.9 (vistas lateral y frontal en Anexo C).

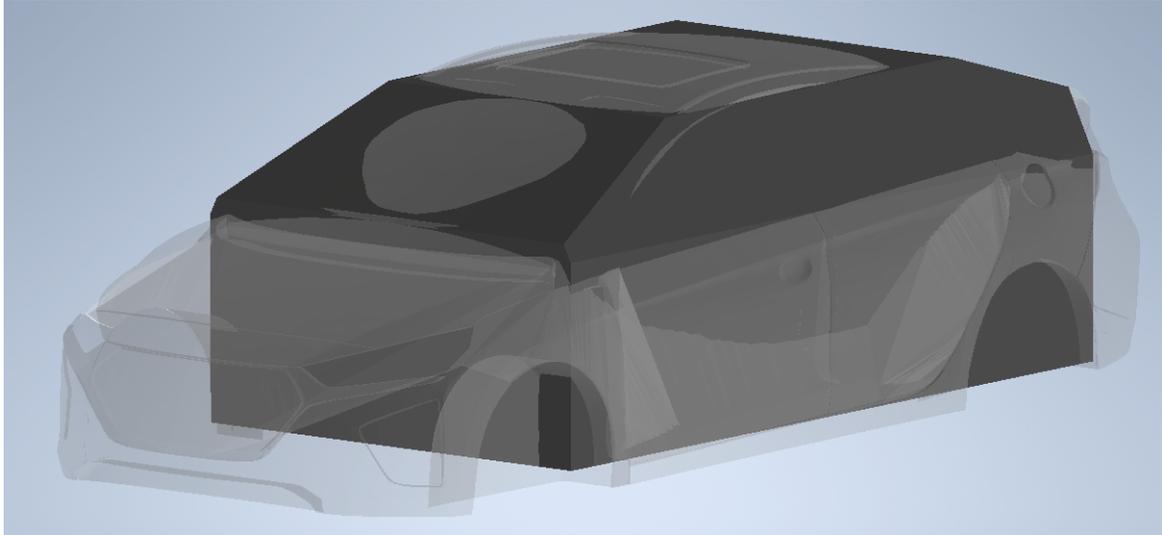


Figura 4.9: Polígono obtenido en contraste con la cabina.

En la Figura 4.10 se muestra el polígono final obtenido para la cabina del vehículo. Se pueden ver en color celeste las superficies de ventanas, en gris el techo y el resto representa las puertas, el contacto con el maletero y el capot.

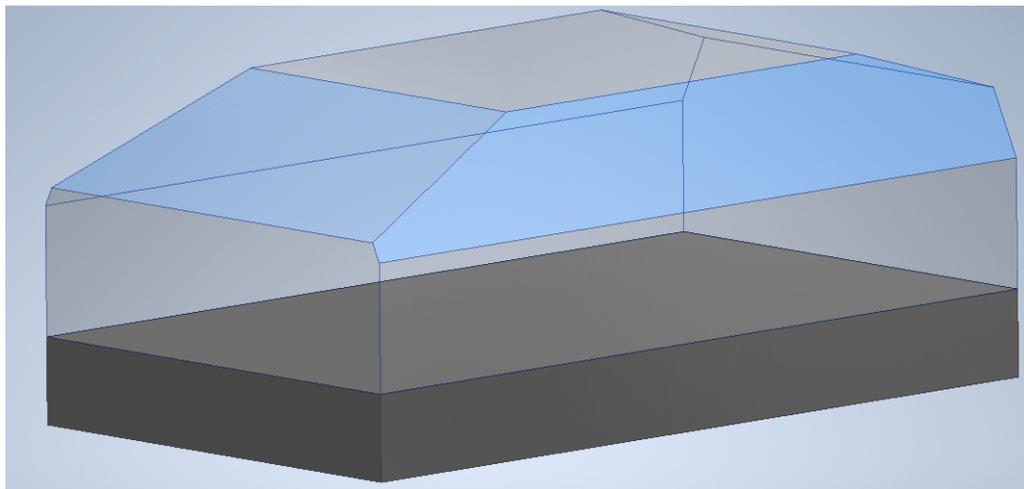


Figura 4.10: Polígono final utilizado para el modelo. Componentes en negro, aire transparente.

4.2.2. Volúmenes del modelo

El método de balance de calor aplicado en los referentes mencionados anteriormente utiliza una mezcla de elementos generalizados compuesta por el aire de la cabina y los componentes internos al nombre de

DTM, lo que representa asientos, paneles, botonería y otros. Sin embargo, estos modelos a pesar de que diferencian las propiedades de los materiales en aire y otros componentes, el elemento generalizado involucra a ambos materiales en una misma inercia térmica (Ecuación 4.1) por lo que un cambio en la temperatura del aire involucra un cambio de temperatura igual en los componentes [8][9].

$$\sum \dot{Q}\Delta t = (m_a \cdot c_a + m_{DTM} \cdot c_{DTM}) \cdot \Delta T_{cabina} \quad (4.1)$$

Suponer un comportamiento de la cabina de este tipo involucra tener una temperatura igual en toda la cabina a cada momento. Además esto supone la absorción inmediata de la radiación transmitida a través de las ventanas, elimina la interacción convectiva entre los componentes y el aire, y supone una conducción instantánea del calor en todo el cuerpo unificado.

Esta dependencia anclada entre aire y componentes no permite capturar la verdadera dinámica de la temperatura del aire, principalmente porque el calor necesario para calentar (o enfriar) el aire un grado dependerá de calentar (o enfriar) también todos los componentes esa misma temperatura, los cuales están sujetos a una inercia térmica mucho mayor al poseer mucha más masa [17].

Sin embargo, el modelo propuesto por Marcos [21] propone dividir completamente los elementos unificados de aire de la cabina y componentes de la cabina, relacionando sus temperaturas por fenómenos de convección natural, pero no atándolas a ser iguales en cada momento. Esta diferenciación es la que se aplicará en este trabajo en conjunto con los fenómenos físicos que involucra.

Como se mencionó antes, el volumen de componentes involucra la suma de todos los elementos de la cabina que conforma el panel, la botonería, los asientos y otros volúmenes enfocados en la funcionalidad, la estética, la aislación y la comodidad. Si bien estos componentes tienen diversas formas y texturas, separar cada una de estas superficies requiere un estudio acabado de la composición material de cada uno de estos elementos, así como sus pesos y propiedades, y en vista de no tener esos datos, se supone un conjunto de propiedades de densidad, calor específico y conductividad iguales en todo el elemento unificado.

Otro aspecto importante a considerar es la forma de los componentes. Al igual que en [21], se establecerá un volumen rectangular, a fin de simplificar los efectos de reflexión en la radiación interna. En caso de querer involucrar estos efectos, se requeriría un estudio detallado sobre la geometría del vehículo, pero este tipo de requerimiento aplicaría a un análisis *CFD* y no a un modelo flexible.

Considerando el volumen ocupado por los componentes en el modelo 3D original, se genera la división de la cabina en dos partes; aire y componentes, tal como se muestra en la Figura 4.10. En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestran las propiedades de cada uno de los volúmenes del polígono, en donde se usa para los componentes la capacidad calorífica usada en [21], suponiendo intrínsecamente una masa y una calor específico similar a los componentes del *BMW 1* usado en ese estudio (basado en sus dimensiones, Anexo D). Se utiliza además una conductividad promedio entre los 0,06 y los 0,12 [K m /W] del algodón y el polipropileno respectivamente, materiales considerados para la fabricación de asientos y tableros [11].

Tabla 4.2: Propiedades del aire a 20°C [11].

Volumen [m3]	Densidad [Kg/m3]	Conductividad [W/K m]	Calor específico [kJ/Kg K]	Prandtl	Viscosidad cinemática [m2/s]
3,631	1,204	0,02514	1,007	0,7309	1.516*10**(-5)

Tabla 4.3: Propiedades térmicas y radiativas de los componentes de la cabina [21] [11].

	Volumen [m3]	Capacidad calorífica [kJ/K]	Conductividad [W/m K]	Absortividad	Reflectividad
Componentes	1,451	144,24	0,09	0,7	0,3

4.2.3. Superficies del modelo

En el método *HBM* para vehículos, el aire de la cabina recibe cargas térmicas de las distintas superficies. Estas superficies deben ser estudiadas de manera individual, dependiendo de sus características y materiales, tomando como referencia las caras del polígono simplificado del vehículo. Las superficies relevantes son mostradas en la Figura 4.11, en donde se ve: Parabrisas (S1), ventanas laterales (S2), ventanal trasero (S3) y Techo (S4).

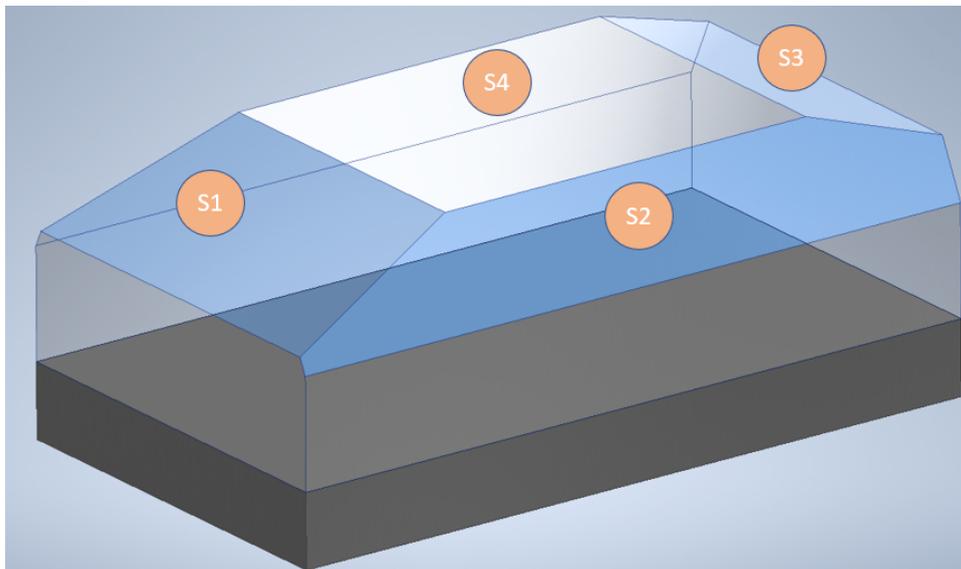


Figura 4.11: Superficies del vehículo (polígono) rotuladas.

Si bien, cada superficie responderá a los mismos fenómenos convectivos, conductivos y radiativos, su materialidad y propiedades térmicas harán variar su comportamiento. Se destaca por ejemplo, el caso del techo por el que la radiación no logra transmitirse, o el caso de las ventanas cuyos distintos espesores y composiciones variarían el porcentaje de la radiación transmitida. En la tabla a continuación se muestran las propiedades térmicas de los materiales usados para la descripción de superficies.

Tabla 4.4: Propiedades conductivas y radiativas para materiales de distintas superficies.

	Conductividad [W/m K]	Transmitividad	Absortividad	Reflectividad
Vidrio parabrisas	1,4	0,452	0,302	0,246
Vidrios laterales	1,4	0,475	0,325	0,2
Vidrio trasero	1,4	0,311	0,589	0,1
Pintura techo	1,4	0	0,26	0,74
Acero	14,9	0	–	–
Algodón	0,06	0	0,7	0,3

Las superficies laterales no se consideran en los intercambios térmicos entre el exterior y el interior, y por ende se consideran adiabáticas, apoyadas en la suposición realizada por [21] acerca de la baja conductividad térmica de estas superficies en relación a la ventanas, además de tener un ángulo menos directo en relación al sol. Sin embargo, estas superficies podrían considerarse en el caso de realizar un estudio más acabado y más complejo, considerando los datos reales de los materiales del vehículo.

Las superficies frontales que tienen contacto con el maletero y la zona del capot son consideradas también adiabáticas, ignorando por la aislación el intercambio térmico que podría existir con estos volúmenes de sólidos y aire. Al igual que el caso anterior, podría crearse un modelo que incorpore todos estos elementos acoplados, pero eso aumentaría la complejidad del problema y el número de datos de entrada, por lo que tomando el ejemplo de [21][17][8] solo se consideraran superficies adiabáticas.

Por último, es importante agregar que debido a que los componentes interactúan con el aire de la cabina, es necesario considerar también su superficie como una más del sistema. Sin embargo, la diferencia de esta superficie con las anteriores, es que, debido sus dimensiones como elemento unificado, su inercia térmica debe ser considerada dentro del problema involucrando su capacidad calorífica. Para el caso de las otras superficies, su inercia térmica es despreciada en comparación al aire y los componentes, debido a su bajo volumen y por ende baja masa.

En la Tabla 4.5 se muestra un resumen de sus características espaciales. Cabe destacar que su ángulo está medido con respecto a la horizontal, y que su largo corresponde a la arista del plano que está inclinada. Además, estos largos, si bien, pueden variar en superficies no rectangulares, se usa tanto para su largo y su ancho el promedio entre su valor mínimo y máximo según corresponda.

El espesor del techo es, además, dividido en cuatro secciones: una capa de pintura en contacto con el exterior, la cual solo será considerada en sus propiedades de radiación, una capa de acero de 1,5 [mm], una capa de algodón de 5 [mm] y una capa de aire de 0.1 [mm] [21]. Se establece además que el algodón es la capa interna del techo, y que por ende las propiedades para efectos radiativos internos serán las de este material. Además, la radiación absorbida por el algodón no presentará efectos radiativos entre capas (solo conducción), y la conductividad térmica se obtendrá en forma de una conductividad equivalente y constante para todo el espesor del material.

Las ventanas laterales son consideradas como simétricas e iguales en términos de espesor y propiedades. Todo lo mostrado en la tabla para S2 aplica solo para un lado, por lo que el área de ventanas laterales totales es en realidad el doble de la mostrada.

Tabla 4.5: Dimensiones y propiedades espaciales para cada superficie.

	Área [m ²]	Largo [m]	Ancho [m]	Inclinación [°]	Espesor total [m]
S1	1,196	0,838	1,4275	23,48	0,006
S2	1,102	0,443	2,269	64,17	0,003
S3	0,774	0,574	1,3485	17,3	0,005
S4	2,039	1,611	1.266	0	0,0065
S5	4,835	2,927	1.652	0	0,3

4.3. Modelo térmico planteado

Considerando la geometría, los volúmenes y las superficies planteadas, se tienen ya los elementos necesarios para plantear el modelo térmico. Como se dijo anteriormente, se tienen como datos de entrada la velocidad del vehículo, temperatura externa (ambiente), la localización geográfica y las radiaciones difusas y directas asociadas a horas y fechas. El objetivo de este modelo será que por medio del planteamiento matemático del problema, se conozcan las temperaturas internas en cada paso de tiempo junto a la totalidad de las cargas térmicas.

Para comprender la seguidilla de fenómenos que ocurren en el vehículo, es necesario comenzar con las primeras cargas térmicas en ingresar al auto, y que son las que desencadenan la cascada de eventos que se irán describiendo a continuación. Adicionalmente, se explican los fenómenos asociados a una superficie genérica, lo que implica que ese comportamiento se reproduce en cada una de las superficies (excepto en S5 que tiene su comportamiento propio).

4.3.1. Entrada de la radiación

En primer lugar, se produce la entrada de dos cargas térmicas: la carga por radiación directa y radiación difusa, cuya diferenciada fue explicada en el capítulo de antecedentes. Al impactar con la superficie externa del vehículo, cada una de estas radiaciones se divide en tres partes. Una porción es reflejada de vuelta a la superficie, otra es absorbida por la superficie, y la última es transmitida a través del material hacia la parte interior del vehículo. Estas cantidades dependerán de los valores de τ , ρ y α , pudiendo ser nulas si la propiedad del material en particular lo dicta.

De esta forma cada una de los valores de radiación enfrentará el fenómeno de separación de la radiación. Cabe destacar que a pesar de que estos valores dependen del ángulo entre la normal de la superficie y la dirección de la radiación, se considera que son constantes sin importar el ángulo, siendo esto una mejora posible para el modelo en caso de que se quiera ganar precisión. Sin embargo, para esto sería necesario realizar un estudio empírico sobre los materiales del vehículo en particular.

- **Radiación directa (I_{dir}):**

El valor de radiación directa llega en términos de irradiancia, es decir, que sus unidades se encuentran en [W/m²]. De esta forma, la irradiancia debe ser aplicada en un área para obtenerse un valor de potencia, y esta área corresponde al área de la superficie en cuestión, tal como lo muestra la Ecuación 4.2.

$$\dot{Q}'_{dir} = I_{dir} \cdot A_s \quad (4.2)$$

Donde:

- Q'_{dir} : Carga de radiación directa bruta [W]
- I_{dir} : Irradiancia directa [W/m²]
- A_s : Área de la superficie en cuestión [m²]

Debe considerarse también que las superficies no se encuentran necesariamente perpendiculares a la dirección de la radiación, por lo que debe ponderarse el valor de la radiación incidente por la incidencia, un valor entre 0 y 1 en función de ángulos solares y la orientación de la superficie. Su obtención se explicó en el capítulo de antecedentes y debe ser calculada para cada superficie en cada momento del viaje, ya que la orientación del vehículo cambia durante todo el trayecto. El método de cálculo para cada incidencia se explica más adelante, pero es importante saber que existe esta ponderación.

$$\dot{Q}_{dir} = \dot{Q}'_{dir} \cdot \cos(\Theta) \quad (4.3)$$

Donde:

- Q_{dir} : Carga de radiación directa [W]
- Θ : Ángulo de incidencia

Una vez obtenido el valor de radiación directa, este se somete a la división en radiación transmitida, absorbida y reflejada. Solo se toman en cuenta para estos efectos las dos primeras, ya que la radiación reflejada no interactúa más con el vehículo. De esta forma, y utilizando los valores de cada superficie según las Tablas 4.4 y 4.5, se obtienen los valores de radiación directa transmitida y radiación directa absorbida, según la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{dir} = \dot{Q}_{dir,\alpha} + \dot{Q}_{dir,\tau} + \dot{Q}_{dir,\rho} \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{dir,\tau} = \dot{Q}_{dir} \cdot \tau \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_{dir,\alpha} = \dot{Q}_{dir} \cdot \alpha \quad (4.6)$$

Donde:

- $Q_{dir,\alpha}$: Carga de radiación directa absorbida [W]
- $Q_{dir,\tau}$: Carga de radiación directa transmitida [W]
- $Q_{dir,\rho}$: Carga de radiación directa reflejada [W]

■ Radiación difusa (I_{dif}):

En el caso de la radiación difusa, el procedimiento para obtener la radiación difusa absorbida y la transmitida es muy similar al caso de la directa, salvo dos excepciones.

La primera de ellas es que al venir desde todos lados de la atmósfera no tiene un carácter direccional como la radiación directa, y por ende el valor de la incidencia no debe ponderarse. La expresión queda de la siguiente forma:

$$\dot{Q}'_{dif} = I_{dif} \cdot A_s \quad (4.7)$$

Donde:

- Q'_{dif} : Carga de radiación difusa bruta [W]
- I_{dif} : Irradiancia difusa [W/m²]

El segundo cambio en el procedimiento está dado por los valores de τ , α y ρ . Ellos dependen de la temperatura del cuerpo emisor, y por ende son distintos para radiación directa y difusa. Sin embargo, según [22] estos nuevos valores pueden obtenerse considerando la misma superficie y sus valores, pero en un ángulo de 60°. Tomando lo mostrado en [23] y [24], las variaciones de las propiedades se traducen en un aumento aproximado de 0,1 en ρ y una disminución de 0,1 en τ , manteniéndose el valor de α . De esta forma, las expresiones quedan de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{dif} = \dot{Q}_{dif,\alpha} + \dot{Q}_{dif,\tau} + \dot{Q}_{dif,\rho} \quad (4.8)$$

$$\dot{Q}_{dif,\tau} = \dot{Q}_{dif} \cdot (\tau - 0,1) \quad (4.9)$$

$$\dot{Q}_{dif,\alpha} = \dot{Q}_{dif} \cdot \alpha \quad (4.10)$$

Donde:

- $Q_{dif,\alpha}$: Carga de radiación difusa absorbida [W]
- $Q_{dif,\tau}$: Carga de radiación difusa transmitida [W]
- $Q_{dif,\rho}$: Carga de radiación difusa reflejada [W]

De esta forma, tomando la radiación absorbida y transmitida de cada uno de estos dos orígenes, se pueden obtener los valores totales por superficie de la forma:

$$\dot{Q}_\tau = \dot{Q}_{dif,\tau} + \dot{Q}_{dir,\tau} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_\alpha = \dot{Q}_{dif,\alpha} + \dot{Q}_{dir,\alpha} \quad (4.12)$$

Donde:

- Q_α : Carga de radiación total absorbida [W]
- Q_τ : Carga de radiación total transmitida [W]

4.3.2. Carga convectiva externa

Corresponde a la carga ambiental dada por la diferencia de temperaturas entre la parte externa de cada superficie y la temperatura ambiente. Como se vio anteriormente, este valor depende, además, del área de la

superficie en cuestión y el coeficiente convectivo externo. Según [8] es posible usar la correlación mostrada en la Ecuación 4.13, en donde se muestra una dependencia solamente de la velocidad del vehículo. Usando esta relación, la carga por convección externa quedaría de la forma mostrada en 4.14.

$$h_{ext} = 0,6 + 6,64 \cdot \sqrt{V} \quad (4.13)$$

$$\dot{Q}_{cv,ext} = h_{ext} \cdot A_s \cdot (T_{ext} - T_{s,ext}) \quad (4.14)$$

Donde:

- h_{ext} : Coeficiente convectivo externo [W/K m²]
- V : Velocidad del vehículo [m²/s]
- $\dot{Q}_{cv,ext}$: Carga convectiva externa [W]
- T_{ext} : Temperatura ambiente (externa al vehículo) [°C]
- $T_{s,ext}$: Temperatura externa de la superficie en cuestión [°C]

4.3.3. Carga conductiva

Corresponde al fenómeno intermedio en cada una de las superficies, traspasando las cargas térmicas externas a las internas (o en sentido contrario según corresponda). La ecuación está dada por la siguiente expresión, según lo visto en antecedentes:

$$\dot{Q}_{cd} = \frac{k_{eq} \cdot A_s}{\Delta x} \cdot (T_{s,ext} - T_{s,int}) \quad (4.15)$$

Donde:

- h_{ext} : Coeficiente convectivo externo [W/K m²]
- k_{eq} : Conductividad equivalente de cada superficie [W/m K]
- \dot{Q}_{cd} : Carga conductiva asociada a la superficie [W]
- Δx : Espesor total de la superficie en cuestión [m]
- $T_{s,int}$: Temperatura interna de la superficie en cuestión [°C]

El valor de k_{eq} corresponde a la conductividad de cada ventana. Sin embargo, para superficies compuesta como el techo es necesario ponderar las conductividades de cada material, usando la siguiente expresión:

$$k_{eq} = \frac{\sum_i \Delta x_i}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{k_i}} \quad (4.16)$$

Donde:

- k_i : Conductividad de cada capa a considerar [W/K m²]
- Δx_i : Espesor de cada a considerar [m]

Como se mencionó anteriormente, la inercia térmica de las superficies se considera despreciable. De esta forma, es posible establecer una relación donde todas las cargas que entran a la superficie tienen que salir de ella ($\sum \dot{Q} = 0$). Teniendo todas las cargas externas definidas, es posible establecer este equilibrio respecto a la parte externa de la superficie, quedando de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{cv,ext} + \dot{Q}_\alpha = \dot{Q}_{cd} \quad (4.17)$$

4.3.4. Carga convectiva interna

Esta carga al igual que la carga externa está asociada con el coeficiente convectivo y la diferencia de temperaturas, en este caso la temperatura de la parte interna de la superficie y la temperatura interna de la cabina. La expresión para la obtención de esta carga es la mostrada a continuación:

$$\dot{Q}_{cv,int} = h_{int} \cdot A \cdot (T_{s,int} - T_{int}) \quad (4.18)$$

- h_{int} : Coeficiente convectivo interno [W/K m²]
- $\dot{Q}_{cv,int}$: Carga convectiva interna [W]
- T_{int} : Temperatura de la cabina [°C]
- $T_{s,int}$: Temperatura interna de la superficie en cuestión [°C]

Ahora bien, en el caso del coeficiente convectivo interno, la expresión necesaria para obtener su valor es un poco más compleja, y dependerá de un gran número de variables. Según lo establecido por Cengel en [11], la misma ecuación para obtener este coeficiente variará dependiendo de la posición de la superficie (por sobre o por debajo de una superficie caliente o fría), o del ángulo que esta tenga. Estas ecuaciones son utilizadas para calcular coeficiente convectivos de convección natural, y por ende supone que la velocidad del aire dentro de la cabina es despreciable.

- **Placa vertical o inclinada:**

Este tipo de superficie caracteriza a todas las ventanas del vehículo en sus distintas inclinaciones. El procedimiento corresponde a una seguidilla de ecuaciones, donde se utiliza el número de Nusselt (Nu), el número de Prandtl (Pr) en este caso del aire, el número de Grashoff (Gr) y el número de Rayleigh (Ra). En primer lugar se describe el coeficiente convectivo como una función de Nu , en donde:

$$h_{int} = \frac{k_f}{L_c} \cdot Nu \quad (4.19)$$

Donde:

- k_f : Conductividad térmica del fluid en cuestión (en este caso el aire) [W/ k m]
- L_c : Largo característico que para estos efectos es el largo definido para cada superficie anteriormente [m]
- Nu : Número adimensional de Nusselt

Luego de esto, se utiliza la relación para placa vertical o inclinada [11], en su versión más compleja y precisa. El número Ra a su vez puede obtenerse según lo que indica la Ecuación 4.21, en función del número de Gr y Pr .

$$Nu = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right]^2 \quad (4.20)$$

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (4.21)$$

Donde:

- Ra : Número adimensional de Rayleigh
- Pr : Número adimensional de Prandtl
- Gr : Número adimensional de Grashof

Finalmente, el número Gr puede obtenerse de las siguientes relaciones [11], en donde la Ecuación 4.23 es usada regularmente para gases ideales, y en este caso se adoptará por simplicidad del algoritmo de resolución:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{s,int} - T_{int}) L_c^3}{\nu^2} \quad (4.22)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{int}} \quad (4.23)$$

Donde:

- g : Aceleración de gravedad [m/s²]
- θ : Inclinación de la superficie en cuestión [°]
- ν : Viscosidad cinemática del fluido en cuestión (en este caso aire) [m²/s]
- β : Coeficiente de expansión volumétrica [1/K]

■ Placa horizontal:

Para una placa horizontal, se dividen las ecuaciones en dos casos. El primer caso representa la ecuación para la superficie inferior de una placa caliente o la superficie superior de una placa fría, y la expresión que se diferencia de las anteriores es la forma de obtener el número de Nusselt, que en este caso se obtiene por la relación:

$$Nu = 0,27 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad (4.24)$$

Además se tiene que, para los casos horizontales, el largo característico es reemplazado por una expresión que relaciona el área con el perímetro de la superficie.

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (4.25)$$

Donde:

- p : Perímetro de la superficie [m]

Para el caso restante, es decir, de la superficie superior de una placa caliente o la inferior de una placa fría, se tiene la siguiente ecuación que depende del rango en el que se encuentre el número de Rayleigh:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} & \text{si } Ra \in (10^4, 10^7) \\ 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} & \text{si } Ra \in (10^7, 10^{11}) \end{cases} \quad (4.26)$$

Para terminar esta sección, es importante adelantar que al algoritmo de resolución utilizara al método de inversión de matrices para resolver el problema en cada paso de tiempo. Debido a esto, todas las incógnitas usadas en el problema deben ser de carácter lineal, y por ende, las ecuaciones de convección serían un problema para aplicar este método, así como también para la simplificación del problema. Para lidiar con esta situación, se utiliza el valor de la temperatura en el paso de tiempo anterior.

4.3.5. Interacción de cargas térmicas y componentes

Anteriormente se estableció que la radiación térmica transmitida a través del vidrio llegaba a la cabina, traspasando el aire y siendo absorbida por las superficies al interior del vehículo. Se supone, para estos efectos, que toda la radiación transmitida a través de las ventanas es absorbida exclusivamente por la masa de componentes, y no por otras superficies internas. De esta forma la superficie de componentes es calentada e interactúa por convección interna con el aire de la cabina del vehículo. La expresión se define de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{cv,c} = h_c \cdot A_c (T_c - T_{int}) \quad (4.27)$$

- h_c : Coeficiente convectivo interno de componentes [W/K m²]
- $\dot{Q}_{cv,c}$: Carga convectiva interna entre componentes y aire [W]
- T_c : Temperatura del elemento unificado de componentes [°C]
- A_c : Área de la superficie de los componentes que interactúa con el aire de la cabina [m²]

El coeficiente convectivo h_c utiliza las ecuaciones para placa horizontal, dependiendo de la temperatura de superficie y la temperatura interna del vehículo, como se vio en la sección anterior.

Se establece, para la simplicidad del modelo, que los bordes externos de los componentes son adiabáticos y por ende la única salida de cargas térmicas del elemento unificado de componentes es a través del aire. Este efecto deprecia efectos convectivos externos y la conducción en el mismo cuerpo, por lo que una mejora inmediata al modelo debiese abordar este punto. Sin embargo, este supuesto es utilizado en [21] y [8], modelos validados empíricamente, por lo que se toma también con el objetivo de simplificar el problema.

Ahora bien, no toda la radiación transmitida a través de las ventanas e incidente en los componentes es absorbida. De hecho, de acuerdo a los valores de transmitividad, absorptividad y reflectividad, una porción de radiación es absorbida y la otra reflejada, comenzando lo que se caracterizara como la segunda iteración

radiativa. En esta etapa la radiación reflejada por los componentes $\dot{Q}_{\tau,\rho c}$ impacta ahora las superficies de S1 a S4. Se asume que la porción de radiación que impacta en ella en esta segunda iteración está en la misma proporción a la radiación que ingresó por esta superficie respecto al total.

Una vez que impacta la radiación en esta superficie, esta nuevamente se separará en tres partes, la absorbida, la reflejada y la transmitida. Para el techo, la componente transmitida será nula. De esta forma, se agrega un término de radiación absorbida $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\alpha}$ a cada superficie, una parte de la radiación puede eliminarse del problema transmitiéndose hacia el exterior, y otra porción vuelve a reflejarse. Esta nueva radiación reflejada por las superficies de techo y ventanas $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho}$ incidirá nuevamente en los componentes.

El proceso de rebote de esta radiación en los componentes se produce nuevamente, produciéndose una $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\alpha c}$ que absorben una vez más los componentes y una $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\rho c}$ que nuevamente va hacia las superficies. Esta última radiación se supondrá que es absorbida o desechada de la cabina, eliminando la carga térmica de $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\rho c,\rho}$ al ambiente. Este proceso de iteración puede repetirse variadas veces, pero se toman las dos primeras iteraciones por simplicidad.

4.3.6. Finalización del modelo

Con todos los efectos definidos sobre cada volumen y superficie, se establecen las ecuaciones que relacionan cada una de las variables. En primer lugar, realizando el equilibrio sobre cada una de las superficies internas de S1 a S4, considerando convección interna, absorción de radiación interna de las dos iteraciones y la conducción proveniente de la superficie externa, se define:

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{Q}_{cv,int} - (\dot{Q}_{\tau,\rho c,\alpha} + \dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\rho c,\alpha}) \quad (4.28)$$

Donde:

- $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\alpha}$: Radiación absorbida por la superficie en cuestión, luego de transmitirse por esa superficie y rebotar en los componentes (primera iteración) [W]
- $\dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\rho c,\alpha}$: Radiación absorbida por la superficie en cuestión luego de ser transmitida por la superficie, rebotar en los componentes, en la superficie y en los componentes nuevamente (segunda iteración) [W]

En la imagen Figura 4.12 se muestra un diagrama representativo de las cargas térmicas en cada superficie. Notar que las líneas punteadas representan las distintas iteraciones de las cargas radiativas.

De la misma forma, el equilibrio térmico en los componentes conlleva una sumatoria de cargas térmicas ligadas a una inercia térmica y al cambio de temperatura entre pasos de tiempo. En este fenómeno interactúa la convección interna con el aire de la cabina, y la absorción de la radiación de la primera y segunda iteración. En la Ecuación 4.29 se muestra la expresión resultante para el equilibrio térmico de los componentes.

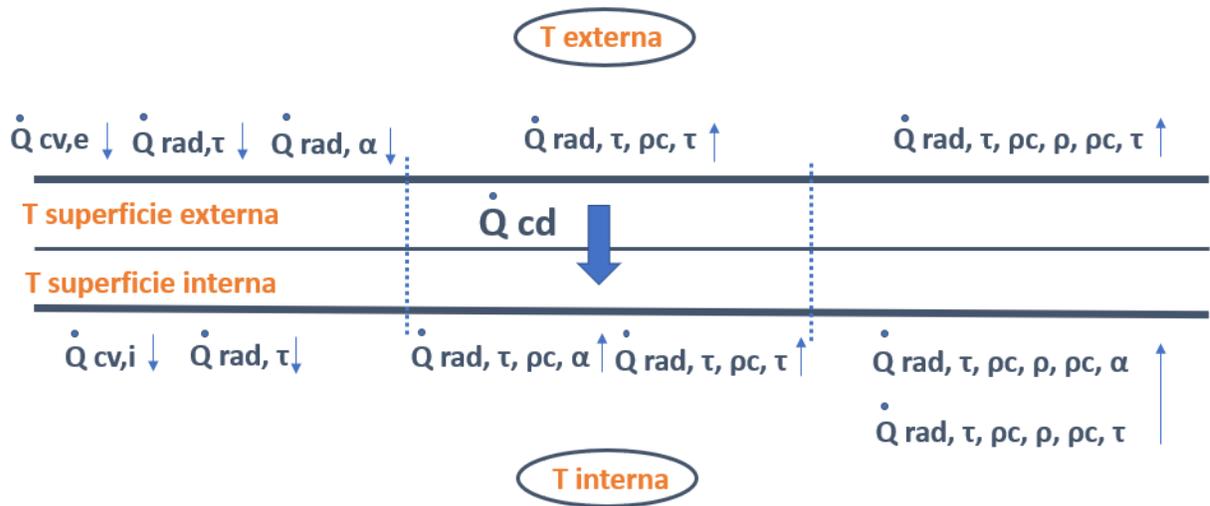


Figura 4.12: Cargas térmicas asociadas a cada superficie de S1 a S4.

$$\dot{Q}_{\tau, \alpha c} + \dot{Q}_{\tau, \rho c, \rho, \alpha c} - Q_{cv, c} = C_c \cdot \frac{T_{c, i} - T_{c, i-1}}{\Delta t} \quad (4.29)$$

Donde:

- $\dot{Q}_{\tau, \alpha c}$: Carga térmica de radiación absorbida por los componentes, proveniente de la transmitida la través de las ventanas [W]
- $\dot{Q}_{\tau, \rho c, \rho, \alpha c}$: Carga térmica de radiación absorbida por los componentes, proveniente de reflexiones previas en los componentes y otras superficies de la cabina [W]
- C_c : Capacidad calorífica del volumen unificado de componentes [J/ K]
- $T_{c, i}$: Temperatura de los componentes en el paso de tiempo actual [°C]
- $T_{c, i-1}$: Temperatura de los componentes en el paso de tiempo anterior [°C]
- Δt : Paso de tiempo considerado [s]

Cabe destacar que todos los valores mencionados en las ecuaciones a lo largo del modelo involucran las temperaturas y cargas térmicas del paso de tiempo actual, excepto en los caso en los que se indique (como en el coeficiente convectivo interno). De esta forma, solo cuando lo amerite se escribirán los sufijos i , $i - 1$ e $i + 1$ en la segunda posición para referirse al paso de tiempo, y en el caso contrario se usa por defecto el valor presente.

En la siguiente figura, puede verse un resumen de todas las cargas que interactúan con las superficies, los componentes y el aire de la cabina. Las cargas que interactúan con las superficies se escriben solamente una vez por limpieza de la imagen, pero debe entenderse que estas se replican para cada superficie. Notar que existen cargas térmicas no escritas en los balances térmicos de cada volumen o superficie, básicamente porque estas, si bien, interactúan con el elemento en cuestión, no hay un efecto térmico considerado, al menos para efectos del presente modelo.

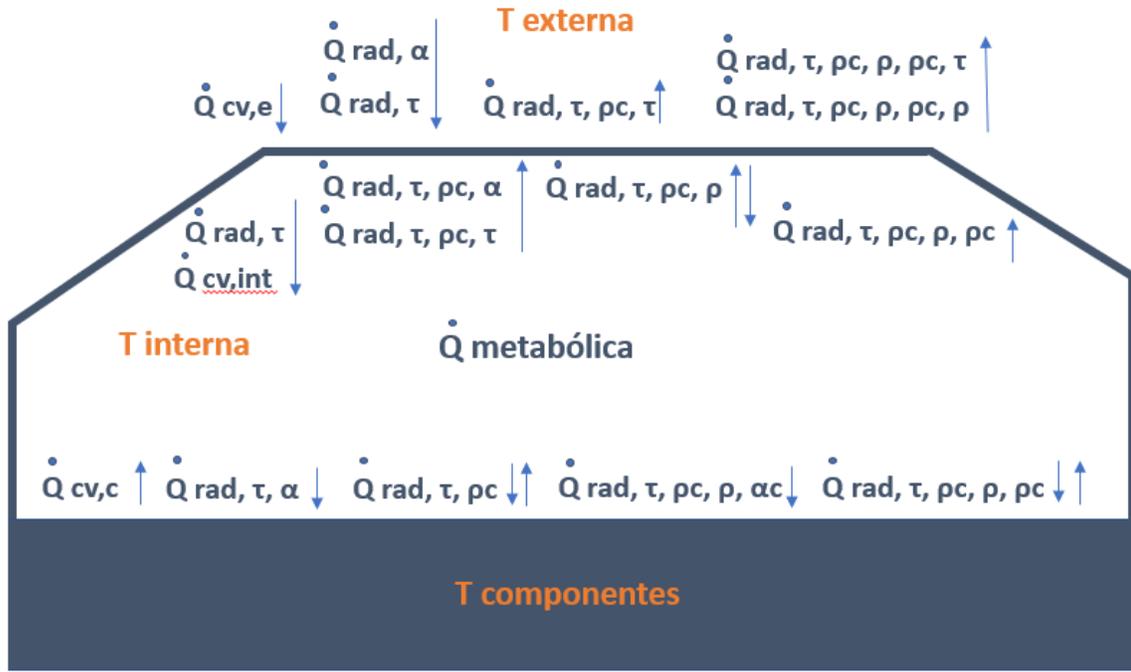


Figura 4.13: Cargas térmicas del modelo general.

Tomando en cuenta esto, y recordando la definición mostrada en el capítulo de antecedentes para la carga metabólica, se tiene la Ecuación 4.30, la que muestra el equilibrio térmico para el aire en cada paso de tiempo. Este considera las cargas convectivas tanto de las superficies como de los componentes, la carga metabólica y la carga por aire acondicionado. Todo esto se realiza en función de la inercia térmica del aire y la diferencia entre la temperatura de la cabina en el paso de tiempo actual y la temperaturas de confort, que corresponde a la temperatura que se busca al interior de la cabina por medio de la climatización.

$$\sum_s \dot{Q}_{cv,int,s} + \dot{Q}_{cv,c} + \dot{Q}_{AC} + \dot{Q}_{met} = m_a \cdot c_a \cdot (T_{int,conf} - T_{int,i}) \cdot \frac{1}{t_c} \quad (4.30)$$

Donde:

- $\sum_s \dot{Q}_{cv,int,s}$: Suma de las cargas térmicas por convección interna entre cada superficie y el aire [W]
- \dot{Q}_{AC} : Carga térmica a contrarrestar por aire acondicionado [W]
- \dot{Q}_{met} : Carga metabólica [W]
- m_a : Masa del aire en la cabina [Kg]
- c_a : Calor específico del aire [J/ Kg K]
- $T_{int,i}$: Temperatura de la cabina en el paso de tiempo actual [°C]
- $T_{int,conf}$: Temperatura de confort de la cabina (temperatura deseada) [°C]
- t_c : Constante de tiempo del fenómeno [s]

Sin embargo, si la carga \dot{Q}_{AC} se considerara utilizando la diferencia entre la temperatura actual y la temperatura de confort, el aire acondicionado compensaría un equilibrio inmediato de la cabina, lo que es poco realista por dos motivos: supone que los fenómenos térmicos en la cabina son instantáneos (o inmediatos para efectos de un paso de tiempo de 5 [s]); supone que el aire acondicionado tendrá la capacidad de contrarrestar la potencia de calor necesaria sin importar su magnitud, lo que es poco realista considerando que la magnitud de potencia máxima de compresores similares al utilizado en este vehículo ronda entre los 1000 y 2000 [W] [18][17][19].

Por este motivo, el término de diferencia de temperaturas se ve limitado por una constante de tiempo t_c , la que según [8] puede ser obtenida de la expresión en 4.31. Cabe destacar que el valor t_p representa el *pull down time*, tiempo que se demora en promedio la cabina en llegar a la temperatura de confort, y que tiene un origen empírico. Fayazbakhsh recomienda un valor de 600 [s] para esta variable.

$$t_{constant} = \frac{t_{pulldown}}{\ln(T_{int,0} - T_{int,conf})} \quad (4.31)$$

$$t_{pulldown} = 600[s]$$

Donde:

- $t_{pulldown}$: Tiempo de origen empírico que demora en lograrse el equilibrio térmico impuesto por climatización [s]
- $T_{int,0}$: Temperatura inicial del vehículo antes de considerar el funcionamiento del aire acondicionado [°C]

Es importante destacar que, para efectos del algoritmo de resolución, en caso de que la temperatura inicial de la cabina sea igual a la temperatura de confort, la constante de tiempo adopta el valor de 1 a fin de evitar errores matemáticos en el modelo.

Dependiendo del valor que tome la constante t_p , el equilibrio térmico llegará antes o después al problema. Este valor incide fuertemente en el modelo, ya que al evolucionar las temperaturas con mayor rapidez, implica tener por mayor cantidad de tiempo una diferencia de temperaturas significativa, aumentando el consumo por climatización (al menos desde el punto de vista teórico).

Finalmente la diferencia de temperaturas real alcanzada en la cabina en cada paso de tiempo será la mostrada en la Ecuación 4.32, en donde una vez más la constante de tiempo limita el valor de esta diferencia. De esta forma, la temperatura de la cabina para el siguiente paso de tiempo se calcula como dice la Ecuación 4.33. El cambio de temperatura (valor absoluto) se agregará, restará o simplemente no se hará dependiendo de si se ha alcanzado la temperatura de confort, y si es mayor o menor a la temperatura actual de la cabina.

$$\Delta T = \frac{|T_{int,i} - T_{int,conf}|}{t_{constant}} \cdot \Delta t \quad (4.32)$$

Donde:

- ΔT : Cambio de temperatura de la cabina calculado entre el paso de tiempo actual y el siguiente [K]

$$T_{int,i+1} = \begin{cases} T_{int,i} + \Delta T & \text{si } T_{int,i} < T_{conf} \\ T_{int,i} - \Delta T & \text{si } T_{int,i} > T_{conf} \\ T_{int,i} & \text{si } T_{int,i} = T_{conf} \end{cases} \quad (4.33)$$

4.4. Cálculo de la incidencia solar

El cálculo de la incidencia solar necesita de la orientación del vehículo para estimar la alineación entre la dirección de la radiación directa y la normal de la superficie en cada momento. Sin embargo, no se cuenta con la orientación del vehículo para realizar dicho cálculo, por lo que debe obtenerse ese valor de la información de la trayectoria según las coordenadas de latitud y longitud.

Para esto se desarrolla la idea de establecer un cambio de posición para cada paso de tiempo, y respecto al vector de desplazamiento instantáneo calculado en cada paso se define la orientación del vehículo. El cálculo de la orientación de cada superficie, y por ende, de su ángulo azimut, se desarrolla tomando como referencia la orientación del vehículo obtenida, desplazando este valor por el ángulo que corresponda según la orientación de dicha superficie.

Cabe destacar que para el paso de tiempo inicial, se utiliza el supuesto de que la orientación del vehículo no cambia en los primeros dos pasos de tiempo, utilizando dos veces el resultado del primer cambio de posición. Considerando un volumen de alrededor de 580 pasos de tiempo, la imprecisión que puede agregar esta aproximación se considera despreciable.

Se desarrolla de esta forma el cálculo del ángulo azimut, basado en la siguiente imagen. En ella se muestra una rosa de los vientos con dos puntos en ella A y B, los que representan la posición del vehículo en el primer y segundo paso de tiempo respectivamente. Cabe destacar que esta rosa de los vientos actualiza su posición central en cada paso de tiempo a la ubicación geográfica de ese paso de tiempo.

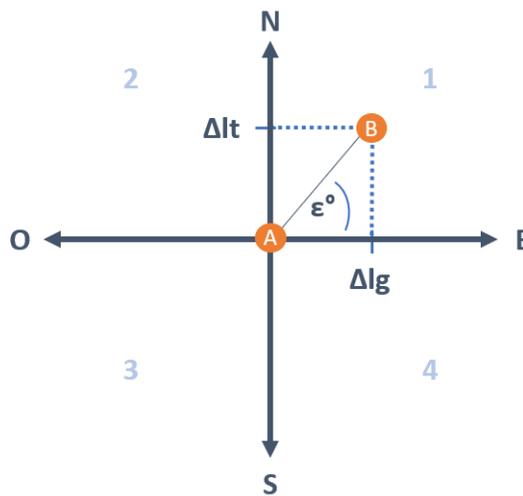


Figura 4.14: Modelo básico para el cálculo de azimut por cambio de posición.

Notar que existe también un ángulo ϵ asociado al cambio de posición, y un número de cuadrante. El

número de cuadrante que ocupara el punto B respecto al punto A, estará dado por si la diferencia entre los valores de latitud y longitud son positivos. Por ejemplo, una posición en el cuadrante número 3 implica que la diferencia de latitudes es negativa, así como también la diferencia de longitudes.

Es importante destacar que esta relación matemática entre la diferencia de latitudes y longitudes se cumple ya que la latitud crece hacia el norte (infinito positivo del eje y en el plano cartesiano), y la longitud crece hacia el este (infinito positivo del eje x en el plano cartesiano). Por esta razón, ir hacia el cuadrante 1 siempre significara una diferencia positiva de ambas variables, e ir hacia el cuadrante 3 siempre significara ambas diferencias negativas.

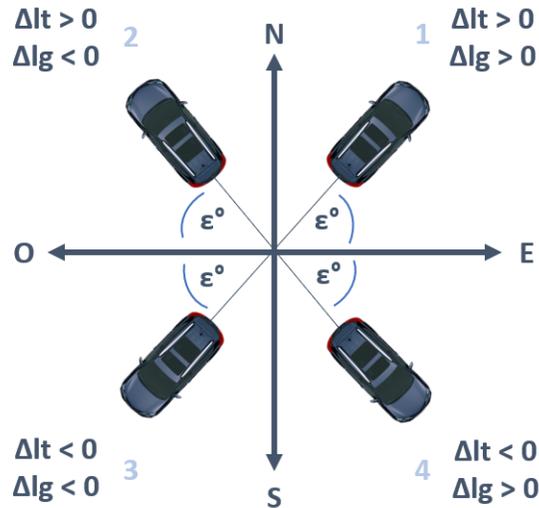


Figura 4.15: Orientación del desplazamiento del vehículo según diferencias de latitudes y longitudes.

Respecto a la imagen anterior se puede entender claramente que la diferencia de latitudes y longitudes conllevara a la formación a un ángulo ϵ que irá cambiando de cuadrante según el signo. Para garantizar que este ángulo sea siempre igual para las mismas magnitudes en las diferencias de latitud y longitud, se establece la ecuación siguiente para obtener su valor:

$$\epsilon = \arctg\left(\frac{|\Delta l|}{|\Delta g|}\right) \quad (4.34)$$

Donde:

- ϵ : Orientación del vehículo [$^\circ$]
- Δl : Diferencia entre latitudes en cada cambio de posición
- Δg : Diferencia entre longitudes en cada cambio de posición

Recordando lo establecido en antecedentes sobre el ángulo azimut (γ), este tiene un valor que varía entre (-180° ; 180°), cuya posición 0° es la dirección sur, y alcanza valores positivos para el oeste y negativos en el este. El auto de la misma forma, también tiene una forma de orientación basada en el ángulo de cada superficie con respecto a la orientación del auto. De esta forma, se establece la siguiente nomenclatura para acordar gráficamente tanto la orientación del ángulo azimut como el los ángulos de las superficies:

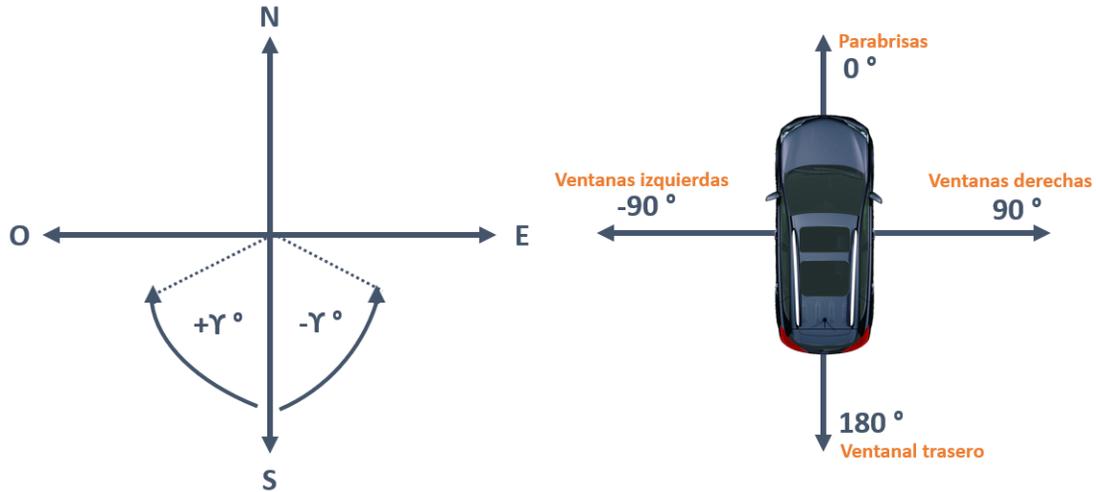


Figura 4.16: Ángulos definidos para caracterizar azimut según rosa de los vientos (izquierda), y para identificar la dirección de la superficie según orientación del auto (derecha).

Considerando la información anterior, el ángulo azimut se calcula entonces siguiendo las siguientes ecuaciones:

■ **Primer cuadrante:**

$$Azimut(\gamma) = \begin{cases} -(90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = 0 \\ (90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = 180 \\ -(90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = 90 \\ (90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = -90 \end{cases} \quad (4.35)$$

■ **Segundo cuadrante:**

$$Azimut(\gamma) = \begin{cases} (90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = 0 \\ -(90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = 180 \\ -(90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = 90 \\ (90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = -90 \end{cases} \quad (4.36)$$

■ **Tercer cuadrante:**

$$Azimut(\gamma) = \begin{cases} (90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = 0 \\ -(90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = 180 \\ (90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = 90 \\ -(90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = -90 \end{cases} \quad (4.37)$$

■ **Cuarto cuadrante:**

$$Azimut(\gamma) = \begin{cases} -(90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = 0 \\ (90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = 180 \\ (90 - \varepsilon) & \text{para } \xi = 90 \\ -(90 + \varepsilon) & \text{para } \xi = -90 \end{cases} \quad (4.38)$$

Donde:

- ξ : Ángulo de orientación de superficie respecto a orientación del vehículo [°]

Estas operaciones se realizan para cada paso de tiempo en cada superficie, dependiendo del cuadrante. Luego utilizando la Ecuación 2.12, y utilizando la información de la sección 2.4.2 para establecer los distintos ángulos por fechas y horas, es posible calcular el valor de la incidencia solar. El factor que pondera la incidencia de un nivel de radiación sobre una superficie será de esta forma $\cos(\Theta)$.

Para finalizar el modelo para el cálculo del azimut, se hacen pruebas según el número de pasos de tiempo que ocurren entre cada cálculo de desplazamiento, asociado a una diferencia de latitudes y longitudes. Cabe destacar que mientras más pasos de tiempo se consideren para la diferencia de posición, más pasos de tiempo se mantendrá constante la orientación del vehículo en un principio.

Dicho lo anterior, podría parecer poco ventajoso considerar una gran diferencia de pasos de tiempo, pero la ventaja que tiene es poder eliminar cambios bruscos de ángulo, poco representativos del curso normal de un vehículo. En la siguientes imágenes se muestra la evolución del cálculo del azimut utilizando como viaje de prueba el ocurrido el 01 de abril. Esta evolución no corresponde a un resultado del modelo, ya que se considera parte del tratamiento de los valores de entrada de este. Se decide utilizar la diferencia de 10 pasos de tiempo (50 segundos).



Figura 4.17: Prueba para cálculo de azimut para viaje del 01 de abril, calculando diferencias de posición entre 2 pasos de tiempo.

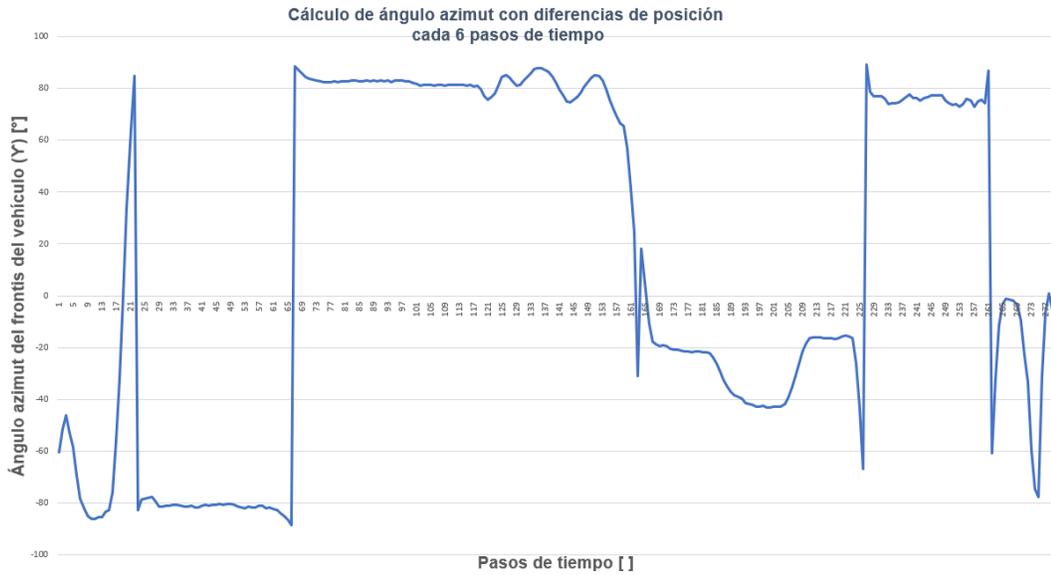


Figura 4.18: Prueba para cálculo de azimut para viaje del 01 de abril, calculando diferencias de posición entre 6 pasos de tiempo.



Figura 4.19: Prueba para cálculo de azimut para viaje del 01 de abril, calculando diferencias de posición entre 10 pasos de tiempo.

4.5. Implementación y resolución

La estructura de la implementación del código en lenguaje `.py` debe permitir la resolución automática del modelo al ser ejecutado, de manera de que una vez ingresadas las variables de entrada del modelo junto a los datos de viaje y ambientales, solo reste la ejecución del modelo para obtener los datos y gráficas resultantes. El ejecutable debe ser capaz además de guardar las variables relevantes del problema de forma ordenada, con el objetivo de que puedan ser consultadas si es que se requiere.

Es importante destacar que el tiempo de duración de la ejecución es un aspecto relevante en la programación del modelo, debido a que en caso de utilizarse en tiempo real, este debe ser capaz de proporcionar la información requerida en pocos segundos. Es por esto, que al momento de desarrollar los algoritmos del código, es importante buscar el mínimo de soluciones iterables o funciones lógicas repetitivas, con el objetivo de disminuir el costo computacional de ejecutar el código.

A continuación, se listan las partes principales con las que se estructura el algoritmo para la resolución del modelo.

4.5.1. Importación de datos:

Esta etapa contempla la importación de todos los módulos y librerías externas, además de los datos ambientales y los datos del viaje. Se utilizan las librerías *Pandas* y *Numpy* para obtener los datos en formato *array* a partir de los archivos *.csv* importados.

Se definen de esta forma los vectores de velocidad del vehículo, fechas, horas, temperatura ambiente, latitud y longitud provenientes del viaje. Como datos ambientales se ingresan las radiaciones difusas y directas entre otros valores de apoyo, las que corresponden a las mediciones para el día exacto del viaje, divididas en 24 horas a lo largo de es día. El algoritmo asignará la radiación difusa y directa de la hora correspondiente. En caso de ampliar este modelo a un uso más general para un gran numero de viajes, debe importarse la cantidad de fechas suficientes para suministrar de datos al modelo.

4.5.2. Ingreso de condiciones iniciales:

Para esta parte del modelo se calculan variables como el largo del vector de tiempo, y respecto al paso de tiempo se construye un vector temporal en segundos. Además, se definen los vectores para conocer los días que contiene cada mes y el número del día desde principio de año.

Además, es necesario definir las condiciones iniciales para las temperaturas de superficies externas e internas, temperatura de los componentes, y la temperatura interna de la cabina. Se establece al mismo tiempo la temperatura de confort y la variable de *pull down time* t_p . También se crea una función que permita eliminar el error matemático que produce que las temperaturas iniciales de cabina y de confort sean iguales, estableciendo un valor de t_c igual a 1.

Se define una función auxiliar para realizar extracción de la información requerida en formato *array* de la salida de cada función.

4.5.3. Definición de volúmenes, superficies y materiales:

En esta etapa se utilizan clases de *python* para facilitar la creación de materiales y superficies. Cabe destacar que las clases funcionan como máquinas virtuales para crear objetos con las mismas atribuciones.

Por ejemplo, se define una superficie como un objeto de *python*, que posee propiedades de área, inclinación, ancho, largo, espesores de cada material, etc. Luego cada superficie se crea llamando estas clase, y se le otorgan las características particulares de la superficie en cuestión.

Este ejemplo anterior aplica también para la creación de materiales, en donde la clase materiales permite crear un material con todas sus propiedades conductivas, radiativas y físicas. La ventaja de este método es que permite ordenar el ingreso de información de forma acotada, y al llamar dentro del código a alguna característica, se hace la forma, por ejemplo: *Acero.conductividad*, *Algodon.transmitividad*, *s₁.angulo*, *s₄.ancho*.

Finalmente, se definen los volúmenes tanto de aire como de los componentes, los que tendrán aquí y más adelante las propiedades asignadas según el material del volumen.

4.5.4. Definición y cálculo de la incidencia:

En esta etapa se definen las distintas funciones para el cálculo del ángulo de la incidencia solar, o más bien el efecto de su ponderación entre cada superficie y la dirección de la radiación directa ($\cos(\Theta)$).

Se comienza por la definición de una función que permite alterar al signo del ángulo azimut según corresponda para las dos partes del día. Luego de esto se define una función lógica para calcular el valor del ángulo azimut de la orientación del vehículo, basado en los casos vistos en la sección anterior. Una vez calculado el ángulo azimut del vehículo, se utilizan las convenciones desarrolladas para cada superficie del vehículo según su orientación, mostrada en la Figura 4.16 (derecha).

Establecidas las funciones para el cálculo del azimut, se calcula este ángulo para cada paso de tiempo del viaje y para cada superficie, agrupándose en vectores por cada superficie. El cálculo de la incidencia se desarrolla implementado ecuaciones lógicas simples para implementar los signos y ángulos según la información expuesta en la sección 2.4.2. Se utiliza la Ecuación 2.12 para calcular la incidencia para cada superficie en cada paso de tiempo.

4.5.5. Implementación y cálculo de carga metabólica:

Esta sección es muy acotada ya que no requiere del desarrollo de un algoritmo propio. Se ingresan las variables de peso de pasajeros y altura de pasajeros, asumiendo solo dos pasajeros en el vehículo durante todo el viaje, con estaturas de 80 [Kg] y 1,75 [m] de estatura cada uno. De esta forma se implementan las ecuaciones de la sección 2.3 para calcular la carga metabólica durante todo el viaje.

4.5.6. Funciones para conducción y convección:

En esta sección se definen las funciones para coeficientes convectivos mostradas en la sección 4.3.2 y 4.3.4, implementando las opciones lógicas que permiten distinguir que ecuación debe usarse exactamente dependiendo de las temperaturas del sistema y del ángulo de la superficie.

Se define al mismo tiempo la función que permite calcular la conductividad térmica para superficies mixtas, en específico utilizada para calcular la conductividad térmica equivalente del techo del auto, utilizando la información mostrada en la sección 4.3.3.

Se calcula, sin embargo, solo el coeficiente convectivo externo y la conductividad equivalente del techo, esto debido a que ya se tienen las velocidades del vehículo y la definición de superficies y materiales respectivamente. El cálculo del coeficiente convectivo interno debe realizarse en cada paso de tiempo llamando a la función definida, básicamente porque necesita de las temperaturas de la cabina calculadas en cada paso de tiempo $T_{int,i-1}$ (del anterior) para obtenerse el valor de $h_{int,i}$.

4.5.7. Definición y cálculo de cargas por radiación:

En esta sección se define la función que calcula las cargas por radiación absorbidas y transmitidas al impactar con cada superficie. Este cálculo lo hace diferenciado para radiación difusa y directa aplicando el valor de incidencia o cambio de propiedades según corresponda. Se genera una solución que contiene, en dos columnas distintas, la radiación total absorbida y la radiación total transmitida para cada superficie.

Con esta función definida, se calculan las cargas radiativas por superficies utilizando la función creada y llamando a sus respectivos parámetros. Con la ayuda de la función de extracción de vectores, se generan vectores para cada tipo de radiación en cada una de las superficies. Cabe destacar que desde este momento, se crean dos tipos de superficies s_2 , derecha ($s2d$) e izquierda ($s2i$), utilizando las incidencias diferenciadas para cada superficie y calculando sus cargas de forma separada.

4.5.8. Definición y resolución de funciones para cálculos finales:

Esta etapa requiere un tratamiento matemática adicional a lo mostrado en la sección del modelo térmico, ya que para generar las soluciones del sistema es necesario resolver un sistema de ecuaciones. Notar que debido a las decisiones tomadas a lo largo del modelo, como ignorar la emisión de cuerpo negro para evitar términos de temperaturas elevados a la cuarta potencia, o calculando el coeficiente convectivo con la temperatura del paso anterior, el sistema de ecuaciones tiene un carácter lineal.

Al plantear el problema y debido a la presencia en común de algunas variables en algunas ecuaciones, es posible separar la resolución del modelo en dos sistemas de ecuaciones. Ambos incluyen las ecuaciones mostradas y explicadas a lo largo de toda la sección 4.3, pero se listarán a continuación para facilitar el entendimiento:

■ Primera resolución de ecuaciones:

Para este caso se toman las ecuaciones dispuestas a continuación, realizando un tratamiento matemático para agrupar las incógnitas a un lado de cada ecuación y los valores constantes (para efectos de esta resolución en particular) al otro lado. Las incógnitas de esta resolución para cada una de las superficies son: las temperaturas al interior ($T_{s,int}$) y exterior ($T_{s,ext}$) de cada superficie, el coeficiente convectivo interno (h_{int}), y las cargas convectivas de convección interna ($\dot{Q}_{cv,int}$), convección externa ($\dot{Q}_{cv,ext}$) y

conducción ($\dot{Q}_{cv,ext}$).

$$\dot{Q}_{cv,ext} = h_{ext} \cdot A_s \cdot (T_{ext} - T_{s,ext})$$

$$\dot{Q}_{cd} = \frac{k_{eq} \cdot A_s}{\Delta x} \cdot (T_{s,ext} - T_{s,int})$$

$$\dot{Q}_{cv,ext} + \dot{Q}_{\alpha} = \dot{Q}_{cd}$$

$$\dot{Q}_{cv,int} = h_{int} \cdot A \cdot (T_{s,int} - T_{int})$$

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{Q}_{cv,int} - (\dot{Q}_{\tau,\rho c,\alpha} + \dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\rho c,\alpha})$$

Planteando el sistema de forma matricial, con el objetivo de utilizar el método de inversión de matrices, el sistema queda:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -h_{int} \cdot A_s & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & h_{ext} \cdot A_s \\ 0 & 0 & \Delta x & k_{eq} \cdot A_s & -k_{eq} \cdot A_s \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

$$X = \begin{pmatrix} \dot{Q}_{cv,ext} \\ \dot{Q}_{cv,int} \\ \dot{Q}_{cd} \\ T_{s,int} \\ T_{s,ext} \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

$$B = \begin{pmatrix} -\dot{Q}_{\alpha} \\ -(\dot{Q}_{\tau,\rho c,\alpha} + \dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\rho c,\alpha}) \\ -T_{int} \cdot h_{int} \cdot A_s \\ h_{ext} \cdot A_s \cdot T_{ext} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

Luego, el cálculo de incógnitas se realiza por medio de:

$$(X) = (B) \cdot (A)^{-1} \quad (4.42)$$

Donde:

- (X) : Matriz de incógnitas
- (A) : Matriz de coeficientes

- (B) : Matriz de constantes

■ **Segunda resolución de ecuaciones:**

El procedimiento de resolución es similar al primer sistema planteado, solo que esta vez corresponde a una matriz de dimensiones 2x2, en donde las incógnitas son la carga convectiva de los componentes $\dot{Q}_{cv,c}$ y la temperatura de ellos $T_{c,i}$ en cada paso de tiempo. Las ecuaciones a resolver se encuentran también a lo largo de la sección 4.3, y son mostradas a continuación:

$$\dot{Q}_{\tau,\alpha c} + \dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\alpha c} - Q_{cv,c} = C_c \cdot \frac{T_{c,i} - T_{c,i-1}}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{cv,c} = h_c \cdot A_c (T_c - T_{int})$$

De esta forma, el sistema y su resolución quedan de la forma siguiente, utilizando la Ecuación 4.42 para su resolución.

$$A' = \begin{pmatrix} C_c & 1 \\ -h_c & 1 \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

$$X' = \begin{pmatrix} T_{c,i} \\ \dot{Q}_{cv,c} \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

$$X' = \begin{pmatrix} T_{c,i-1} \cdot C_c + \dot{Q}_{\tau,\alpha c} + \dot{Q}_{\tau,\rho c,\rho,\alpha c} \\ -h_c \cdot T_{i,i} \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

Con los métodos anteriores definidos, el código ejecuta una primera iteración utilizando las condiciones iniciales del sistema como punto de partida, y al final de este paso de tiempo resuelve las Ecuaciones de 4.30 a la 4.33, obteniéndose la información necesaria para el siguiente paso de tiempo. El siguiente paso de tiempo es programada en forma de iteración para todo el largo del vector del viaje, resolviendo de esta forma las dos matrices y las ecuaciones mencionadas para cada paso de tiempo.

4.5.9. Procesamiento y creación de gráficos

En esta etapa se utilizan los resultados calculados por la etapa anterior para construir los vectores de solución de todas las variables relevantes para cada superficie. Es decir, se crean vectores para cada incógnita definida sumado a los coeficientes convectivos externo e interno de cada superficie y la carga por aire acondicionado.

Almacenados estos datos, viene una sección donde finaliza el código destinada a realizar gráficos de las relaciones relevantes y principales resultados a analizar. Para finalizar el código, viene un pequeño algoritmo que viene a finalizar el conteo de tiempo total de ejecución.

Para el análisis entre viajes, se utiliza una temperatura de confort de 20 [°C], y se definen temperaturas iniciales a partir de la temperatura ambiente inicial, tal como se muestra a continuación.

$$T_{int,0} = T_{ext,0} \quad (4.46)$$

$$T_{s,int,0} = T_{c,0} = T_{ext,0} + 3$$

$$T_{s,ext,0} = T_{ext,0} + 5$$

Finalmente, para calcular el consumo energético total por aire acondicionado, se usa la siguiente expresión:

$$Q_{AC} = \sum_{pt} \dot{Q}_{AC} \cdot \Delta t \quad (4.47)$$

Donde:

- Q_{AC} : Consumo energético total del viaje por climatización [J]
- t_{viaje} : Tiempo de duración del viaje [s]
- pt : Número de pasos de tiempo

Capítulo 5

Resultados

5.1. Resultados para cada viaje

Para cada viaje, se muestran los resultados al aplicar el modelo térmico a través de su código ejecutable. Se consideran las variables más importantes del modelo, y se grafican con respecto al tiempo de viaje. A continuación se puede ver una tabla que reúne las características generales de los tres viajes. Cabe destacar que el valor de Q_{AC} corresponde a la suma de valores absolutos de consumo en cada instante de tiempo, por lo que solo indica una carga guía para el suministro energético.

Tabla 5.1: Variables de entrada y resultados principales para viaje enero (1), marzo (2) y abril (3).

	T_{si} inicial [°C]	$T_{s,ext}$ inicial [°C]	T_{int} inicial [°C]	\dot{Q}_{AC} min [W]	\dot{Q}_{AC} max [W]	Q_{AC} [kWh]	$h_{ext}medio$ [W/m ² K]
1	34,6	36,6	31,6	-652,36	-1189,08	0,272	20,02
2	33,3	35,3	30,3	-782,35	-1378,13	0,239	24,4
3	30,4	32,4	27,4	-472,44	-1120,51	0,149	22,27

5.1.1. Viaje 20 de enero del 2020

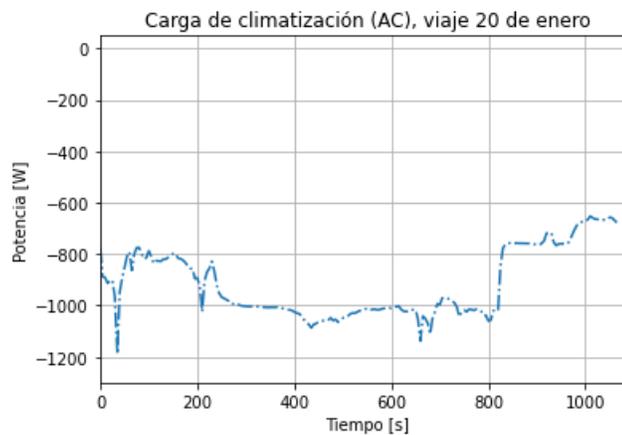


Figura 5.1: Carga térmica asociada a climatización (AC) para viaje del 20 de enero.

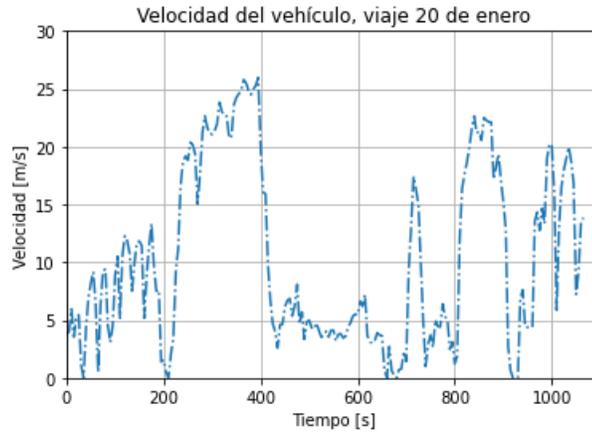


Figura 5.2: Velocidad del vehículo para viaje del 20 de enero.

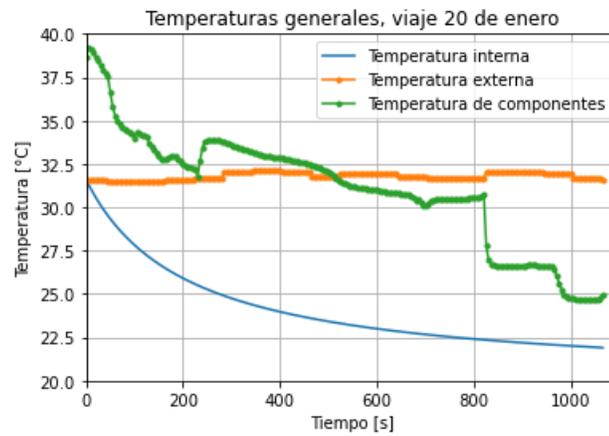


Figura 5.3: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes para viaje del 20 de enero.

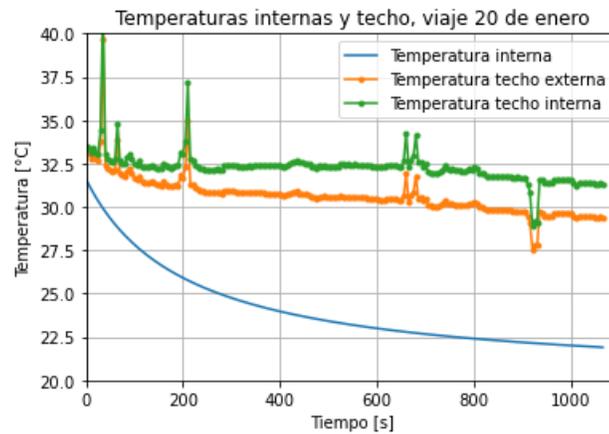


Figura 5.4: Temperatura interna de la cabina y temperatura externa e interna del techo para viaje del 20 de enero.

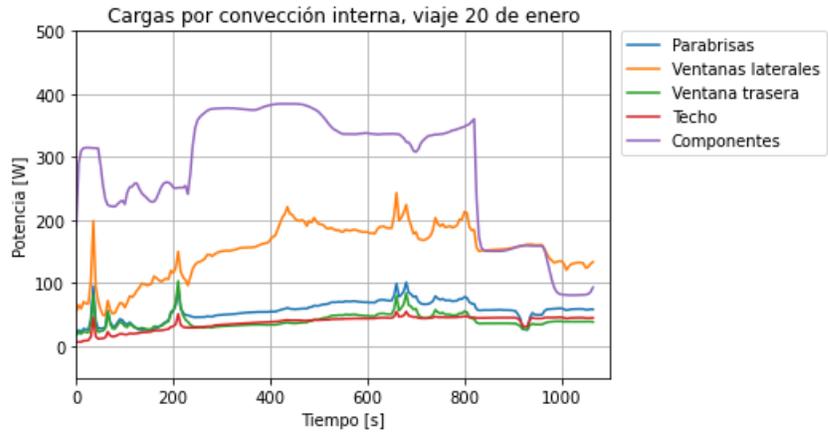


Figura 5.5: Cargas térmicas por convección interna asociadas a cada superficie para viaje del 20 de enero.

5.1.2. Viaje 05 de marzo del 2020

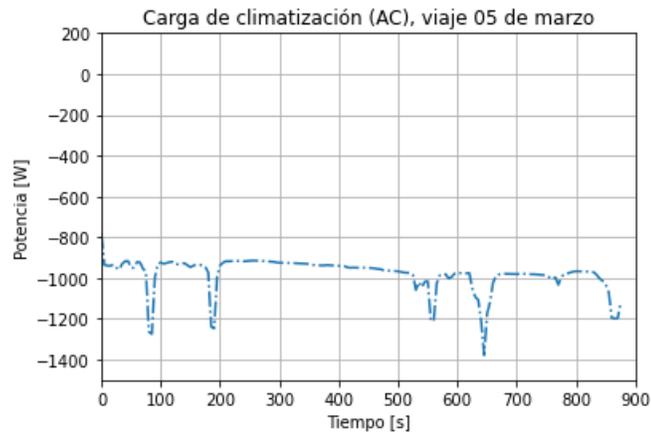


Figura 5.6: Carga térmica asociada a climatización (AC) para viaje del 05 de marzo.

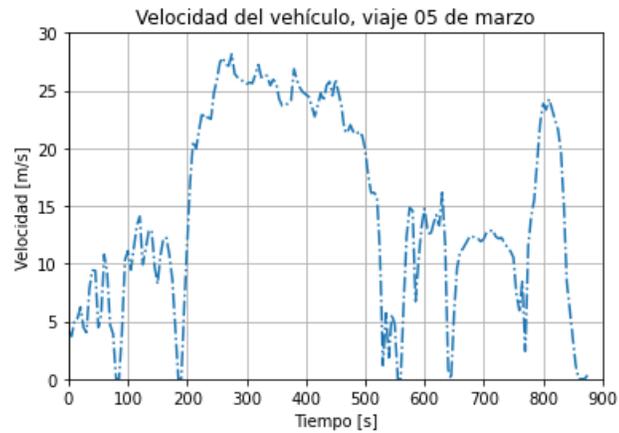


Figura 5.7: Velocidad del vehículo para viaje del 05 de marzo.

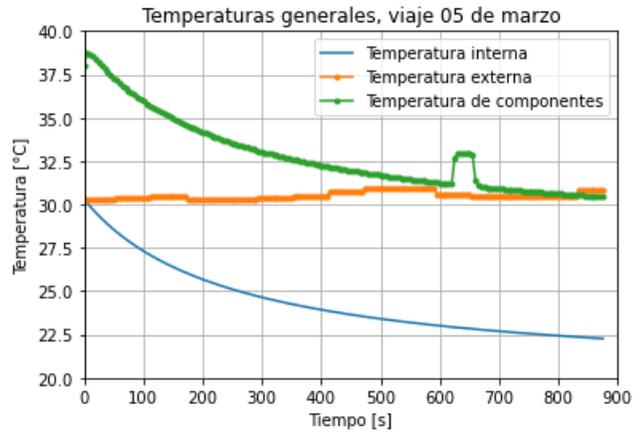


Figura 5.8: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes para viaje del 05 de marzo.

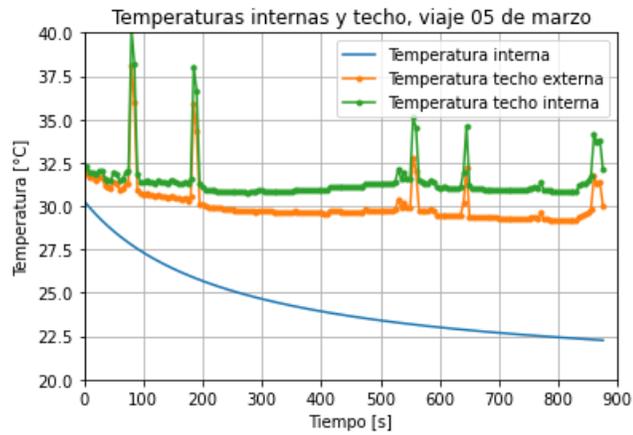


Figura 5.9: Temperatura interna de la cabina y temperatura externa e interna del techo para viaje del 05 de marzo.

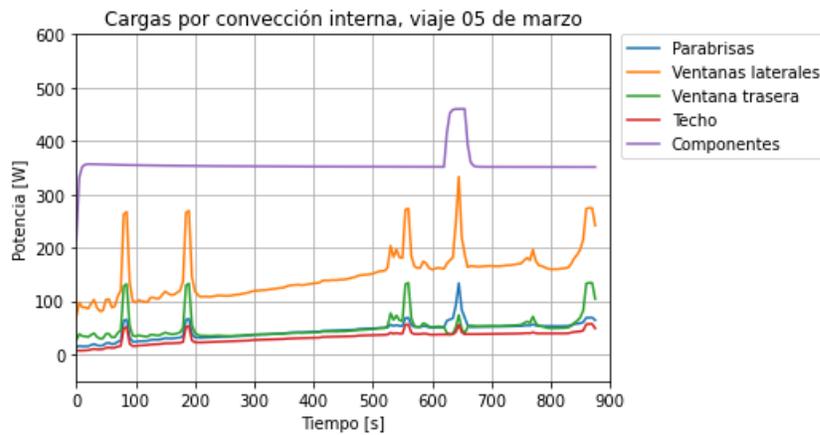


Figura 5.10: Cargas térmicas por convección interna asociadas a cada superficie para viaje del 05 de marzo.

5.1.3. Viaje 01 de abril del 2020

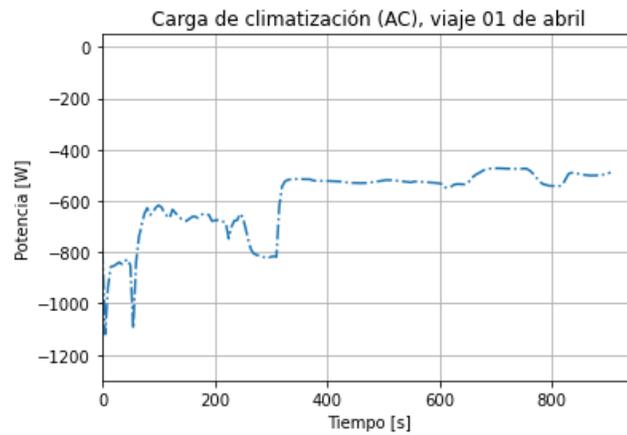


Figura 5.11: Carga térmica asociada a climatización (AC) para viaje del 01 de abril.

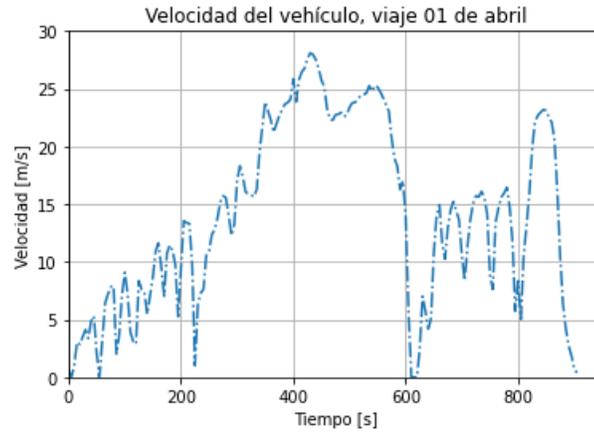


Figura 5.12: Velocidad del vehículo para viaje del 01 de abril.

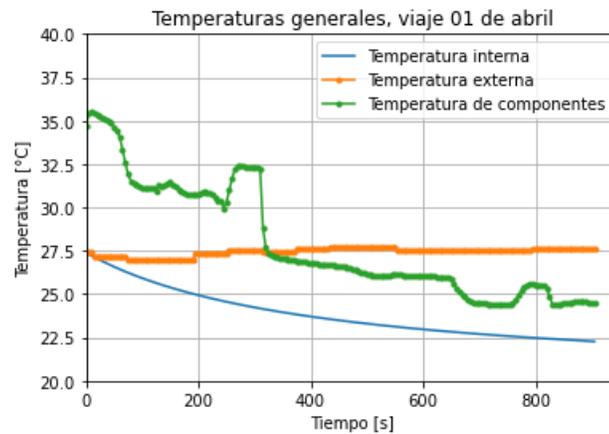


Figura 5.13: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes para viaje del 01 de abril.

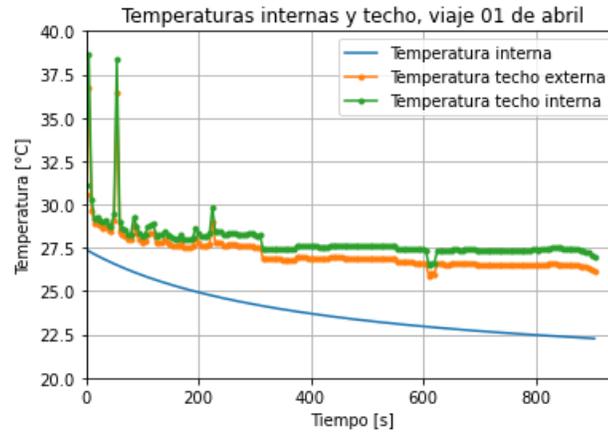


Figura 5.14: Temperatura interna de la cabina y temperatura externa e interna del techo para viaje del 01 de abril.

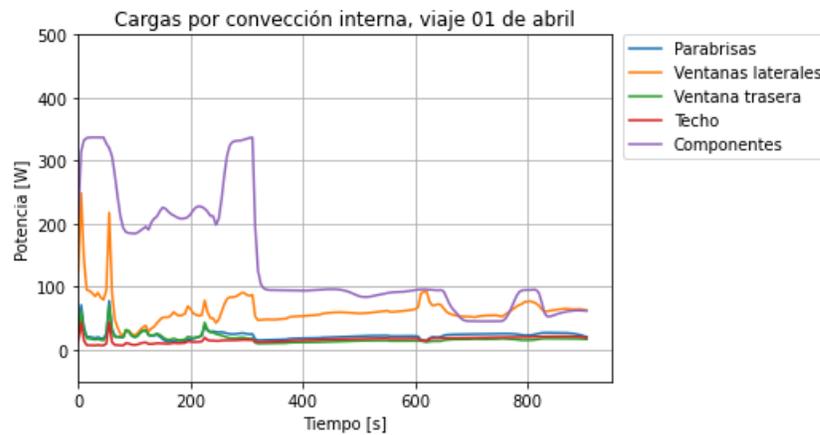


Figura 5.15: Cargas térmicas por convección interna asociadas a cada superficie para viaje del 01 de abril.

5.2. Resultados para variación de valores de entrada

A continuación se presentan los resultados conseguidos para el viaje del 20 de enero, variando: *pull down time* de 600 a 300 y 1200 [s] con el objetivo de apreciar la influencia de la temperatura de estabilización en la rapidez y en el consumo; la temperatura de confort de 20 a 25 y 15 [°C] para evaluar la variación de consumo al establecer condiciones ideales más y menos exigentes; y las condiciones iniciales elevando entre 5 y 7 [°C] las temperaturas de aire y superficies.

Por otro lado, se realiza una simulación de un caso nocturno utilizando el supuesto de radiación directa y difusa nula, y una temperatura ambiente constante de 17,05 [°C], temperatura que se tiene para el mismo día de enero a las 22 [hrs] tal como muestra la Tabla A.1 en Anexo A. Las temperaturas iniciales se mantienen de la misma magnitud que la temperatura externa, y la temperatura de confort se mantiene también en 20 [°C] suponiendo un caso de estabilización térmica.

Finalmente, se simula también un caso frío utilizando las coordenadas del viaje de enero. Sin embargo, la radiación utilizada corresponde a la del mes de abril, con el objetivo de simular las condiciones ambientales

de un mes más frío. La temperatura externa es fijada a -3 [°C] y la temperatura de confort de 23 [°C], y las temperaturas iniciales ligeramente mayores que la temperatura externa, tal como hace [8].

Tabla 5.2: Variables de entrada y resultados principales para viaje del 20 de enero en su caso base, variando *pull down time*, temperaturas de confort, temperaturas iniciales, viaje nocturno y caso de viaje frío (modificaciones de cada caso destacadas).

$T_{s,int}$ inicial [°C]	$T_{s,ext}$ inicial [°C]	T_{int} inicial [°C]	T_{conf} [°C]	t_p [s]	\dot{Q}_{AC} max [W]	Q_{AC} total [kWh]	T_{int} final [°C]
34,6	36,6	31,6	20	600	-1037,7	0,272	21,9
34,6	36,6	31,6	20	300	-1330,39	0,292	21,03
34,6	36,6	31,6	20	1200	-1121,27	0,251	23,27
34,6	36,6	31,6	15	600	-1293,26	0,322	16,77
34,6	36,6	31,6	25	600	-1105,06	0,229	27,04
41,6	41,6	36,6	20	600	-1270,23	0,276	21,77
17,05	17,05	17,05	20	600	-254,63	0,073	18,12
0	-3	2	23	600	557,53	0,105	21,06

5.2.1. Viaje 20 de enero con $t_p = 300$ [s]

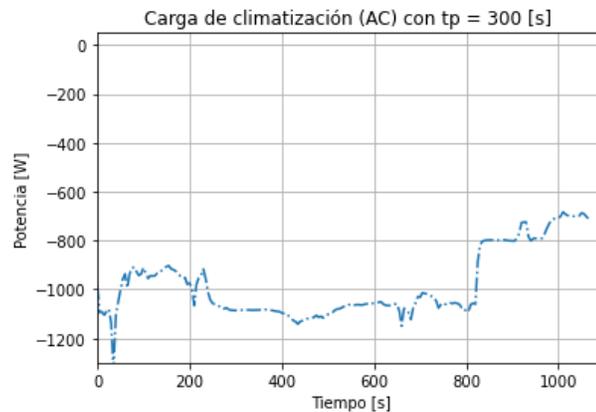


Figura 5.16: Carga térmica asociada a climatización (AC) utilizando $t_p = 300$ [s].

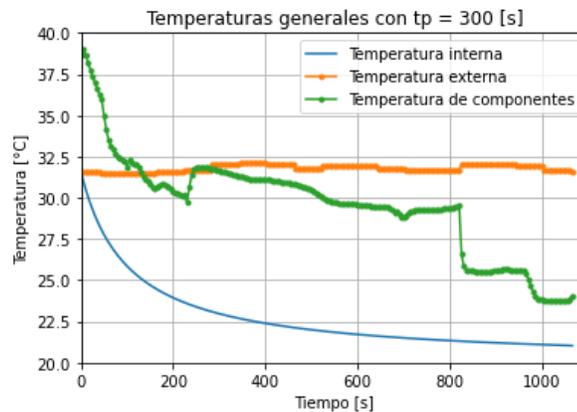


Figura 5.17: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes utilizando $t_p = 300$ [s].

5.2.2. Viaje 20 de enero con $t_p = 1200$ [s]

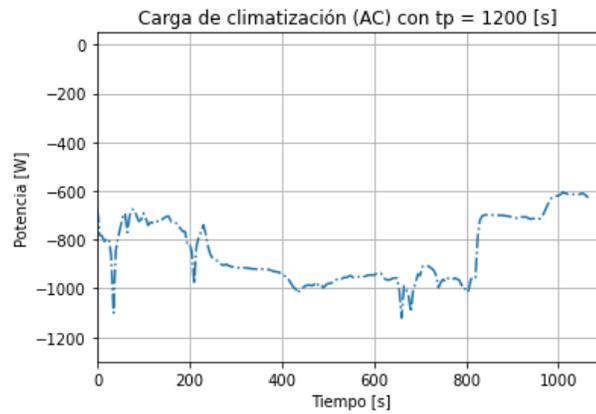


Figura 5.18: Carga térmica asociada a climatización (AC) utilizando $t_p = 1200$ [s].

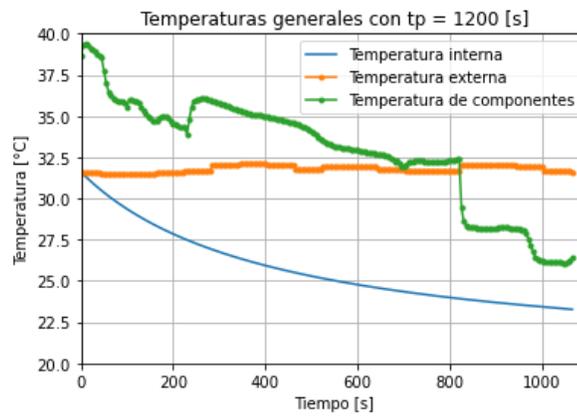


Figura 5.19: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes utilizando $t_p = 1200$ [s].

5.2.3. Viaje 20 de enero con $t_{conf} = 15$ [°C]

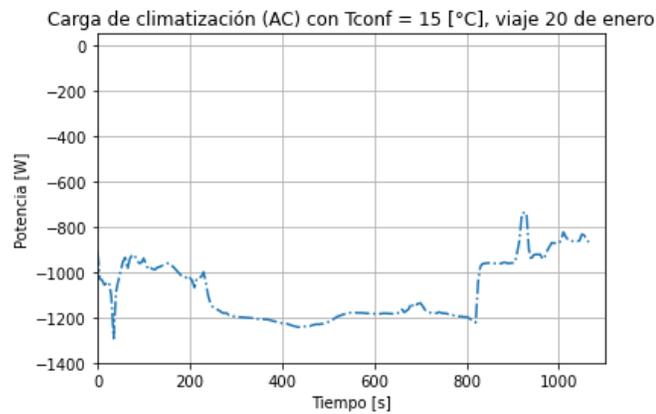


Figura 5.20: Carga térmica asociada a climatización (AC) con $t_{conf} = 15$ [°C].

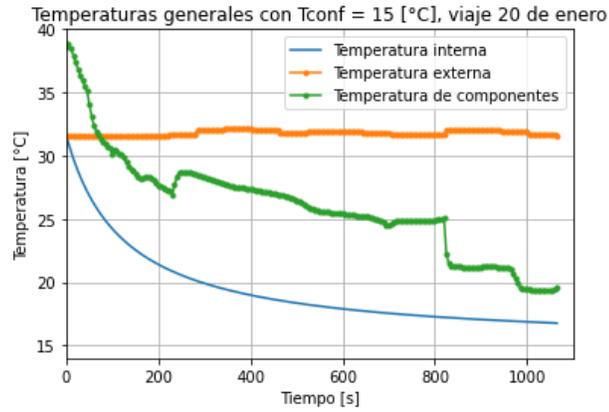


Figura 5.21: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes con $t_{conf} = 15 [^{\circ}\text{C}]$.

5.2.4. Viaje 20 de enero con $t_{conf} = 25 [^{\circ}\text{C}]$

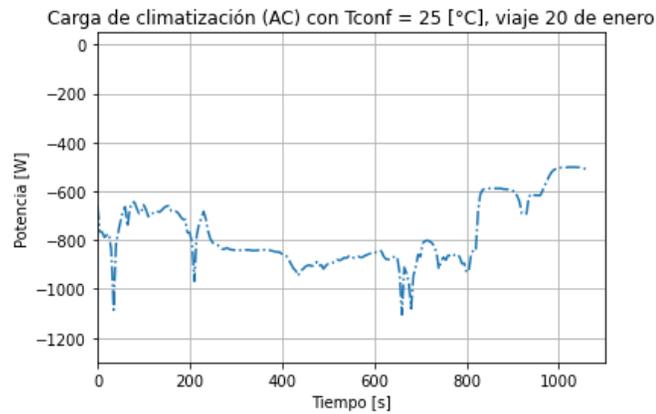


Figura 5.22: Carga térmica asociada a climatización (AC) con $t_{conf} = 25 [^{\circ}\text{C}]$.

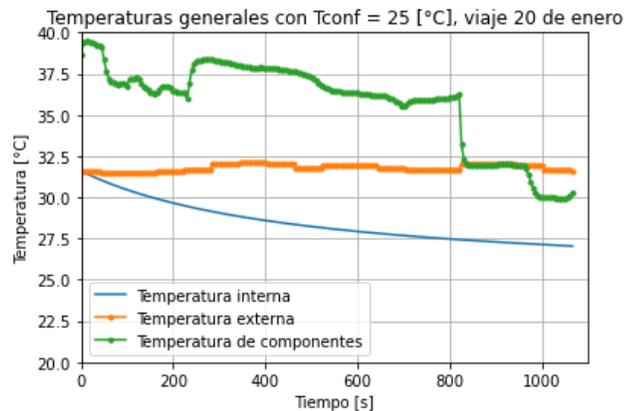


Figura 5.23: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes con $t_{conf} = 25 [^{\circ}\text{C}]$.

5.2.5. Viaje 20 de enero elevando temperaturas iniciales en 5 [°C]

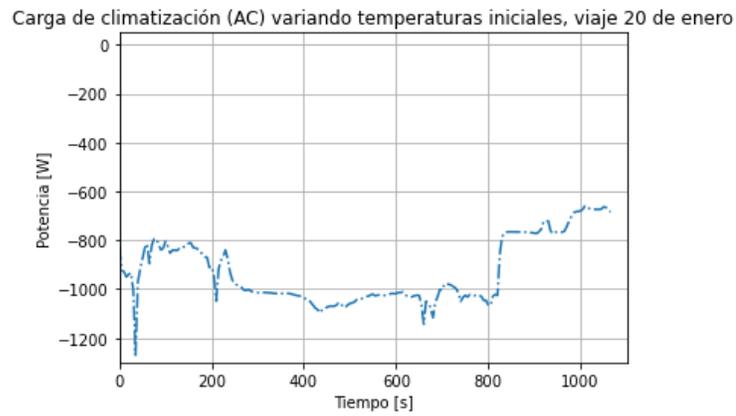


Figura 5.24: Carga térmica asociada a climatización (AC) elevando temperaturas iniciales en 5 [°C].

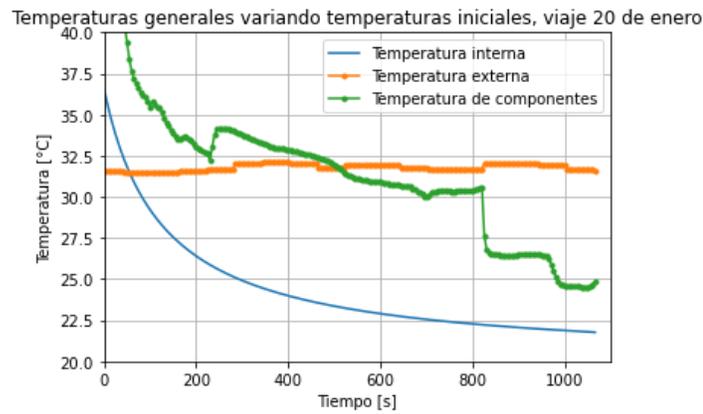


Figura 5.25: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes elevando temperaturas iniciales en 5 [°C].

5.2.6. Viaje 20 de enero, simulación de viaje nocturno

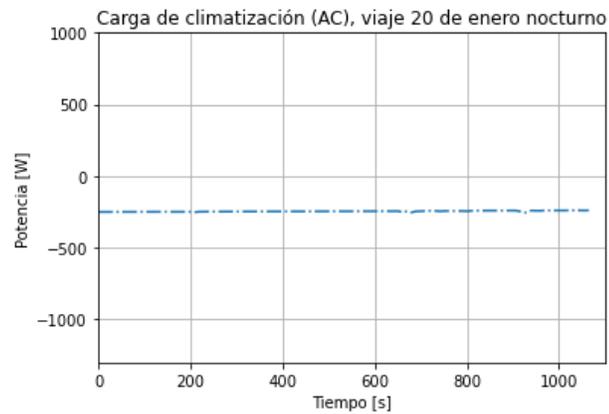


Figura 5.26: Carga térmica asociada a climatización (AC) en simulación nocturna.

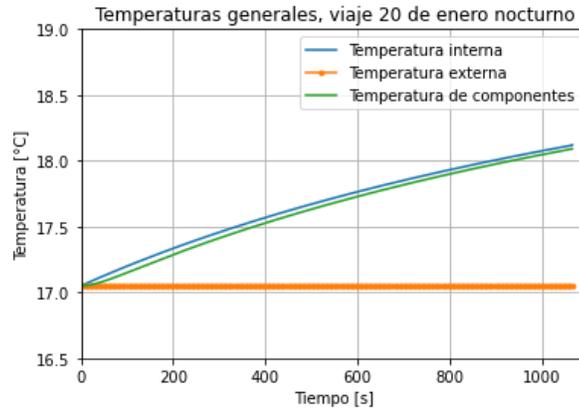


Figura 5.27: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes en simulación nocturna (escala ajustada para notar diferencia entre temperatura interna y de los componentes).

5.2.7. Viaje 20 de enero, simulación de viaje frío

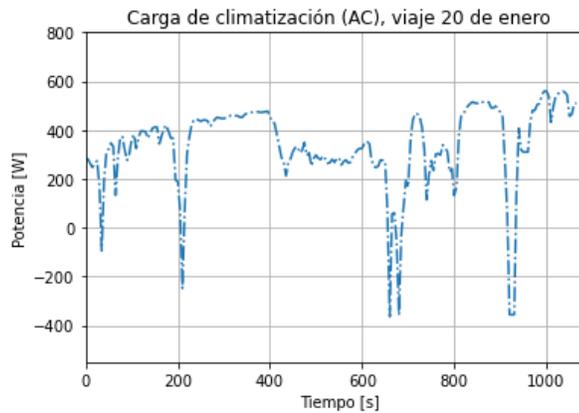


Figura 5.28: Carga térmica asociada a climatización (AC) en simulación de viaje frío.

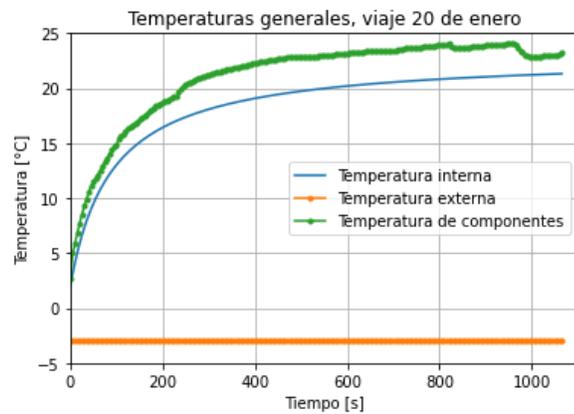


Figura 5.29: Temperatura interna de cabina, temperatura externa y temperatura de componentes en simulación de viaje frío.

Además debido al consumo positivo que indica una calefacción de la cabina (a diferencia de los casos anteriores), se muestra una gráfica del cambio en el consumo del vehículo al variar la temperatura externa, y por ende las temperaturas iniciales manteniendo la diferencia entre ellas.

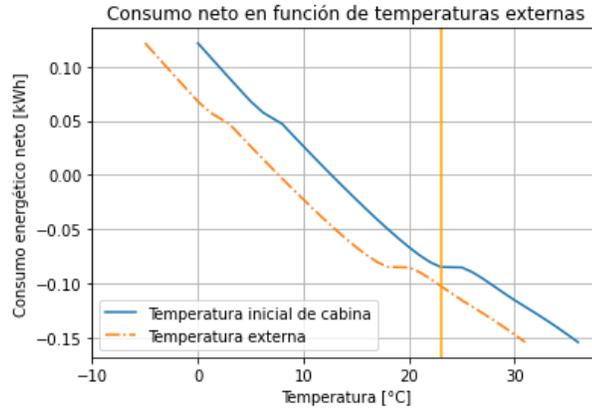


Figura 5.30: Consumo neto por carga de aire acondicionado en función de la temperatura ambiente; línea vertical en temperatura de confort.

5.3. Para comparación con consumo total del vehículo

Utilizando la Ecuación 2.15 junto al valor dado de C_B , y usando la información de la Tabla 5.3, es posible calcular el estado de carga para los viajes en que esta información está disponible, es decir, los viajes de enero y abril. El viaje de marzo no cuenta con los datos de estado de carga adecuados y por ende no es posible presentar resultados de él. La energía total consumida por el vehículo en el viaje también se encuentra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Valores estimados para el consumo total del vehículo en cada viaje.

	SOC_i [%]	SOC_f [%]	ΔSOC [%]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético viaje [kWh]
Viaje 20 de enero	41	37	4	28	1,12
Viaje 01 de abril	82.5	78.5	4	28	1,12

Luego, usando de guía la Figura 2.7, es necesario tener al menos una estimación de la velocidad de giro del compresor y el flujo másico en el evaporador para poder estimar un valor de COP. Esta información se obtiene de la Figura 2.6, en donde se muestran valores de prueba para estas variables. Esto de alguna forma valida también el rango de velocidades y flujos másicos mostrados en la Figura 2.7, mostrando la factibilidad de estos números.

Los valores de velocidad del compresor van desde los 900 a las 4000 [rpm], lo que se traduce en valores de entre 94,25 a 418,88 [rad/s]. Para el caso del flujo másico los valores usados van desde 6,5 a 9 [kg/min], lo que al transformar las unidades arroja valores de entre 0,11 y 0,15 [kg/s] aproximadamente. Usando estos rangos como referencia en el gráfico de la derecha en la Figura 2.7, se obtiene la porción mostrada en la Figura 2.8 en línea punteada. Sin embargo, es necesario mencionar que estos valores corresponden a

valores de prueba, por lo que podría suponerse que el rango de uso abarca también valores menores que las cantidades mencionadas, ampliando el rango de operación.

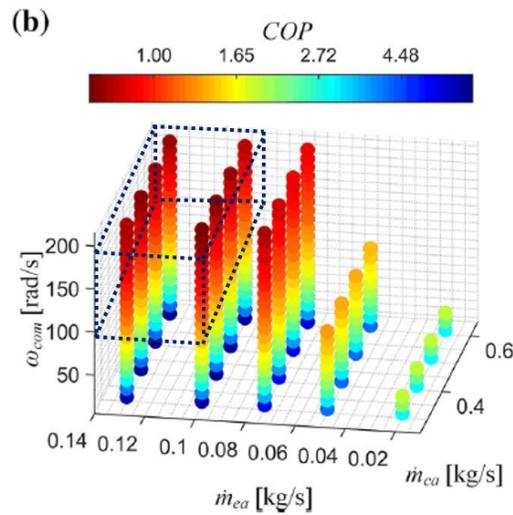


Figura 5.31: Porción gráfica del coeficiente de desempeño obtenida al evaluar valores de prueba para \dot{m}_{ea} y ω_{comp} .

De lo anterior se desprenden dos resultados principales:

- El rango dado por la imagen tomada de [17] entrega valores factibles de las variables relevantes.
- El rango de COP dado por los datos en las Figuras 2.6 y 2.7 se encuentra entre 0,5 y 2,72. Se descartan casos desfavorables de COP cercanos a 0 o casos optimistas de COP superiores a 2.72.

Usando la información anterior, y utilizando la Ecuación 2.13 (y 2.14 para extensión de casos de calefacción), se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla. En ella se muestran los consumos totales y por aire acondicionado del viaje de abril y enero en sus distintas versiones, así como también los porcentajes de consumo que estos representan frente al valor de consumo total del auto de 1,12 [kWh].

Tabla 5.4: Consumo térmico por AC y porcentaje de energía del viaje utilizado en AC para distintos valores de COP, en cada tipo de viaje.

	Consumo AC [kWh]	Consumo porc. AC (COP=0,5)[%]	Consumo porc. AC (COP=1)[%]	Consumo porc. AC (COP=2,72)[%]
Abril	0,239	42,6	21,3	7,83
Enero	0,272	48,6	24,3	8,93
$t_p=300$	0,292	52,14	26,07	9,58
$t_p=1200$	0,251	44,82	22,41	8,24
$T_{conf}=15$	0,322	57,5	28,75	10,57
$T_{conf}=25$	0,229	40,9	20,45	7,52
Nuevas T_0	0,276	49,28	24,64	9,06
Nocturno	0,073	13,04	6,52	2,40
Frío	0,105	18,76	9,38	3,45

5.4. Tiempos de ejecución

Es importante además destacar el tiempo de ejecución del algoritmo. A continuación se muestran los tiempos de demora total para 10 distintas ejecuciones de cada viaje. Estos tiempos incluyen la creación de los gráficos presentados en la siguiente sección.

Tabla 5.5: Tiempos de ejecución para cada viaje en su versión original

Ejecuciones	Tiempo de ejecución viaje enero [s]	Tiempo de ejecución viaje marzo [s]	Tiempo de ejecución viaje abril [s]
1	1,85	1,86	1,77
2	2,07	1,87	1,80
3	1,92	1,85	1,81
4	1,86	1,88	1,78
5	2,00	1,89	1,78
PROMEDIO	1,94	1,87	1,79

Capítulo 6

Análisis de resultados

6.1. Análisis de los tres distintos viajes

En primer lugar y respecto a la Tabla 5.1, se ve que el consumo total más alto por climatización lo tiene el viaje del mes de enero, el cual es a su vez el viaje con mayor temperatura. Se espera que por definición de las cargas térmicas de conducción y convección, estas aumenten su valor conforme la diferencia de temperaturas es mayor (Ecuaciones 4.18 y 4.27). Por ende, tiene sentido que el mayor valor lo tenga el viaje del mes de enero.

Sin embargo, el valor máximo de potencia por climatización se da en el viaje del mes de marzo. Esto podría parecer extraño, pero debe notarse que las temperaturas externas en el viaje de marzo rondan los 30 [°C] (Figura 5.8) y en el de enero los 32 [°C] (Figura 5.3). Teniendo clara esta cercanía de temperaturas y por ende, de similitud de las cargas térmicas, es necesario verificar el valor de la radiación utilizado (Anexo A.1) para ambos viajes, teniendo en cuenta las horas de cada uno (Tabla 4.1).

Al observar la radiación, en las Tablas A.1 y A.2, se puede notar que los niveles de radiación son mucho mayores para el mes de marzo, por lo que se explica de inmediato el comportamiento de la potencia máxima por aire acondicionado. Además el coeficiente convectivo externo, que tiene relación directa con el valor de la carga de convección externa entrante al vehículo, tiene en marzo el mayor valor de todos los viajes. Esto se explica al observar la Tabla 4.1, en donde se indica que para este viaje se alcanzan las mayores velocidades (también de las Figuras 5.2, 5.7 y 5.12), y según la Ecuación 4.17 el h_{ext} está definido enteramente por una correlación de la velocidad.

Ahora bien, es importante notar que en la comparación de la Figura 5.1 y 5.6, se evidencia un crecimiento paulatino en la potencia de la carga de aire acondicionado para el mes de marzo, no así para el mes de enero. Esto se relaciona con el hecho de que aproximadamente a los 800 segundos del viaje de enero, se genera el cambio horario de las 17:00 a las 18:00 horas, lo que cambia los valores de radiación directa a menos de la mitad de su magnitud.

El cambio de hora mencionado anteriormente se evidencia también en las Figuras 5.3, 5.5 y ligeramente en la 5.4. Se observa una caída en la magnitud de las variables del problema después de este paso de tiempo.

En el caso de la Figura 5.3 se muestra un decaimiento muy brusco de la temperatura de componentes, de

cerca de 4 [°C], y esto se explica por el decaimiento de la carga térmica incidente en los componentes. Debe recordarse que este suceso guarda perfecto sentido con la relación expuesta en la Ecuación 4.29, donde se muestra que la única ganancia de calor (ante una cabina más fría) está dada por la radiación transmitida a través de las ventanas del vehículo (en sus dos iteraciones consideradas).

Por otro lado es importante destacar que en la Figura 5.5, los componentes representan la mayor carga convectiva interna, por sobre la carga entregada por cada superficie. Esto guarda relación con la naturaleza de los supuestos utilizados, en donde los componentes absorben la radiación transmitida, elevan su temperatura, e interactúan directamente con el aire, distinto a lo que sucede con las otras superficies, que tienen efectos conductivos de por medio.

La discusión anterior se valida a través de la Figura 5.4 y 5.3, en donde se ve que ante el cambio horario de 5 a 6 pm, la temperatura de componentes decae bruscamente, no así la temperatura del techo. Esto puede deberse a la dependencia de la temperatura del techo, no solo con la radiación, sino también con la temperatura externa, la que no tiene un valor asignado por hora sino por minuto, y por ende, no presenta este decaimiento brusco. De esta forma, se presenta una leve caída en la temperatura del techo, tanto interna como externa.

La caída de temperaturas para las superficies externa e interna en el techo (Figura 5.4) tiene un carácter gráfico particular. Se evidencia que ambas superficies responden de manera muy similar a los cambios de temperatura, pero las curvas van distanciándose conforme avanza el viaje. Esto se explica por el hecho de que las superficies no tienen asociada una inercia térmica, y por ende, al no poder absorber parte de la carga térmica, se replica este comportamiento de igual manera a ambos extremos de la superficie. Sin embargo, el alejamiento entre las curvas es una muestra de que la carga por conducción está haciendo su trabajo, aumentando la diferencia de temperaturas en la superficie, producto del valor de conductividad térmica equivalente.

Respecto a la Figura 5.1 es importante notar dos cosas. La primera es que la carga por aire acondicionado disminuye su magnitud de forma importante al segundo 800 del viaje, apoyando la discusión planteada anteriormente. Esto se apoya con la Figura 5.5, donde se evidencia la importante caída de la carga térmica a contrarrestar, producto de la caída en la carga térmica convectiva proveniente de los componentes.

El segundo aspecto sobre la gráfica 5.1, y al mismo tiempo para 5.6 y 5.11, es el valor negativo que tiene la curva en todo momento. Este aspecto es simple pero de suma importancia en el modelo, ya que revela que el sistema de aire acondicionado debe estar constantemente eliminando esa cantidad de calor por segundo en la cabina, para poder llegar a la temperatura de confort de 20 [°C].

De esta forma, se caracteriza al viaje de enero como bastante sensible a la cantidad de radiación (evidenciado en la caída de la carga térmica de aire acondicionado), pero comparativamente, es dominado por la diferencia de temperaturas con respecto al viaje de marzo. Esto se apoya con la Figura 5.4, en donde las temperaturas de superficie no alteran de manera importante sus valores en el cambio de pasos de tiempo.

De la Figura 5.5 se evidencia que el techo aporta una carga convectiva interna comparativamente menor a las demás, esto a causa de los efectos conductivos considerables ocurriendo en el techo, no así en las ventanas, producto de su baja resistividad térmica debido al espesor y la conductividad del vidrio. Se evidencia además que la carga térmica asociada a las ventanas laterales es la segunda más grande, lo que se puede

asociar con la posición del sol respecto a la orientación del vehículo en la mayor parte del viaje.

Respecto a la temperatura interna, se ve que esta tiene un comportamiento que parece independiente del fenómeno. Esto se explica por las ecuaciones utilizadas para calcular la temperatura interna en el siguiente paso de tiempo (4.32 y 4.33). Esta definición está sujeta solamente a la diferencia de temperatura inicial con la temperatura de confort, a constantes de tiempo, y a la temperatura restante para llegar a la temperatura de confort. Este último valor es el único que varía con el paso de tiempo, haciéndose cada vez menor conforme transcurre el viaje, y por ende, aproximándose cada vez más lento a la temperatura de confort. Esto explica el comportamiento asintótico de la temperatura interna de la cabina.

Considerando que la temperatura interna solo responderá a cambios en si misma, se propone para instancias futuras generar un cálculo de la temperatura de cabina que no dependa solo de si misma en el paso de tiempo anterior, sino que de la magnitud de las cargas térmicas. De alguna forma, el valor limitante es la temperatura actual de la cabina y no la potencia del aire acondicionado, caso que es poco realista, ya que la potencia del aire acondicionado no es mermada por la diferencia de temperaturas de manera tan directa, sino que involucra un cálculo matemático más complejo que conlleva más variables. Sin embargo, ese estudio queda fuera del alcance de este trabajo.

En cuanto al viaje de marzo, el permanecer en el rango horario de la 4 pm se manifiesta en gráficos que presentan pocas evoluciones importantes. Esto se muestra ya en la Figura 5.6, en donde, fuera de los peaks que presenta la señal, la carga por aire acondicionado mantiene un crecimiento paulatino, conforme aumenta la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la cabina, aumentando así las cargas térmicas que debe contrarrestar.

Es interesante notar que los peaks en la magnitud de la carga por aire acondicionado se producen en momentos similares a los cambios bruscos de velocidad (Figura 5.7), lo que puede implicar tanto un cambio en la orientación del vehículo como distintos coeficientes convectivos externos. Sin embargo, de la Figura 5.9 se desprende que estos cambios no pueden estar solamente asociados al cambio de orientación, ya que el techo en su condición de superficie horizontal no debiese percibir esos cambios.

Continuando el punto anterior, en la Figura 5.8 se evidencia un cambio brusco en la temperatura de los componentes pasado los 600 segundos y en ningún otro momento. Recordar que la temperatura de los componentes es sensible a los cambios en la radiación transmitida incidente, por lo que es posible atribuir los cambios en la temperatura de los componentes, a un cambio de orientación brusco. Dicho cambio se tiene al final del viaje del 05 de marzo tal como muestra la Figura 4.3.

Una vez más sobre este aspecto, la Figura 5.10 presenta el mismo cambio en la carga convectiva de los componentes, dado probablemente por el mismo cambio en la orientación.

El comportamiento asintótico de la temperatura interna mantiene las mismas características para los viajes de marzo y abril, debido a que como se dijo antes, el planteamiento del modelo está hecho para que la temperatura interna no sea sensible a las cargas externas, y solamente dependa de su valor anterior a lo largo del viaje.

Para el viaje de abril, se tiene un comportamiento similar al visto en el segundo 800 del viaje de enero, en

este caso evidenciado al rededor de los 300 segundos de viaje. Esto tiene sentido, ya que tal como muestra la Tabla 4.1, el viaje de abril parte 8 minutos y medio después que el de enero. Estos 8 minutos y medio implican 510 segundos de diferencia, muy similar a la diferencia que se ve en las gráficas para apreciar el cambio brusco en las radiaciones.

El cambio mencionado anteriormente se ve la Figura 5.11, 5.13, 5.15 y ligeramente en la 5.14. Esta última curva de la temperatura de techo, una vez más muestra menos sensibilidad al cambio en las radiaciones producto de no depender exclusivamente de este valor para sus cargas térmicas asociadas, sino también de las temperaturas externas. Recordar que esta temperatura es un valor que varía por minuto y no por hora.

Para solucionar estos cambios bruscos en la radiación incidente, podría implementarse un algoritmo de interpolación que permita generar una transición suave en la radiación de una hora a otra, haciendo las condiciones externas del problema más realistas en su comportamiento.

De la Tabla A.3, se puede ver que a pesar de que abril alcanza valores de radiación mayores que enero y marzo, su decaimiento es más importante conforme pasa el día, al punto de que a las 6 de la tarde la radiación se encuentra en valores que no superan los 150 [W/m²] en total. Este comportamiento se evidencia según lo esperado en la Figura 5.15, donde se ve la caída de la carga térmica de los componentes, la que depende de manera directa de la radiación. Notar que la posición del sol es también más baja para esta hora del día conforme se avanza hacia el invierno, por lo que la ponderación de la radiación directa será aún menor producto del ángulo de incidencia.

6.2. Análisis de variación de parámetros

En la Tabla 5.2 se pueden ver los distintos parámetros usados para cada tipo de viaje. Tener en cuenta que todas las mediciones se hacen utilizando el viaje de enero y sus respectivas condiciones ambientales, por lo que cualquier cambio en las gráficas se atribuye al cambio de las variables en negrita en la tabla, a menos que se indique.

El primer caso diferenciado corresponde al cambio de la variable t_p , de 600 a 300 [s]. Este cambio implica un consumo adicional de aproximadamente 0,02 [kWh], y está dado principalmente por el hecho de que al disminuir la constante de estabilización del sistema, se alcanzan temperaturas cercanas a la temperatura de confort más rápidamente. Recordando que la magnitud de las cargas térmicas ambientales guarda relación directa con la diferencia de temperaturas entre la cabina y el exterior, al tener una mayor diferencia de temperaturas más temprana, se produce un mayor gasto energético por aire acondicionado.

Además, es importante notar que la temperatura obtenida al final del viaje es solamente 0,87 [°C] menor, por lo que se plantea la pregunta de hasta qué punto es factible mejorar el tiempo de respuesta del sistema, asumiendo un mayor gasto energético.

Contestando a la pregunta planteada, cabe destacar que este consumo adicional se manifestará solo en la partida del aire acondicionado, es decir, en el estado transiente de estabilización del sistema. Por ende, el gasto extra por aire acondicionado solo se producirá en esta primera etapa, por lo que dependerá del largo del viaje si se justifica esta elección.

Para viajes muy cortos, una capacidad de respuesta baja no será capaz de otorgar el confort necesario a tiempo, antes de que se termine el viaje. Para viajes largos, el margen de consumo extra podría ser despreciable en comparación al gasto en todo el viaje. La respuesta irá en la necesidad, urgente o no, del conductor para llevar el auto a la temperatura de confort.

Para complementar lo anterior, notar que el gráfico de la temperatura interna en la Figura 5.17 muestra una curva asintótica de un comportamiento más agresivo durante el viaje. Por esto, resulta interesante comprobar las especulaciones realizadas analizando un viaje más largo, o en su defecto, disminuyendo aún más la temperatura de respuesta del sistema t_p .

En la Figura 5.18, es posible ver el consumo de aire acondicionado para un caso de t_p de 1200 segundos. Se aprecia gráficamente que el nivel de consumo es menor, apoyado por la Tabla 5.2 en donde se muestra una diferencia de 0,041 [kWh]. Esto se apoya en la explicación dada anteriormente, en donde un tiempo de respuesta más largo obtiene diferencias de temperatura entre la cabina y el exterior, de menor magnitud a lo largo del viaje, reduciendo las cargas térmicas por conducción y convección.

En la Figura 5.19 se puede ver una curva de temperatura interna mucho menos agresiva, cuyo comportamiento se condice con una constante de tiempo que produce cambios de temperatura más pequeños. Esto se complementa con el hecho de que la temperatura de cabina alcanzada al final del viaje corresponde a 23,27 [°C], 1,28 [°C] mayor que la temperatura final del caso normal. Se evidencia con esto una relación no lineal entre la constante de tiempo de estabilización y la temperatura final de la cabina.

Ahora, para el segundo caso de modificación, se tiene una alteración solamente de la temperatura de confort, bajándola de 20 a 15 [°C]. Se espera debido a la diferencia de temperatura mayor entre las condiciones iniciales y la temperatura de confort (también con las temperaturas externas), que el consumo por aire acondicionado sea mayor.

Según la Tabla 5.2, la magnitud del consumo energético por aire acondicionado crece de 0,272 a 0,322 [kWh], es decir, un 18,4%, por una disminución de 5 [°C] en la temperatura de confort para un viaje de menos de 20 minutos. Así, la temperatura alcanzada en la cabina al final del viaje llega a los 16,77 [°C]. Notar también que la temperatura de los componentes decrece de igual forma, ya que el enfriamiento del aire por el sistema de aire acondicionado va extrayendo calor de los componentes debido a la carga convectiva.

Además, a diferencia del caso modificado anterior, este gasto adicional se seguirá presentando en el estado estacionario, ya que una diferencia de temperatura mayor entre el interior y el ambiente implicará una mayor carga de aire acondicionado. De esta forma, se comprueba cómo un cambio de 5[°C] puede tener un impacto importante en el consumo energético.

Para el tercer caso modificado, se tiene que, gracias a establecer la temperatura de confort en 25 [°C], el consumo energético del viaje disminuyó de 0,272 a 0,229 [kWh], es decir, una disminución de 0,043 [kWh], que representa el 15,8%.

A pesar de que la diferencia de consumo vuelve a ser importante, se tiene que porcentualmente, una disminución de 5[°C] en la temperatura de confort es más significativo que un aumento de esos mismo 5 [°C].

La potencia máxima del aire acondicionado es mayor tanto para el caso con una temperatura de confort a 15 como a 25 [°C], por lo que no se le atribuye una influencia directa a las temperaturas de confort sobre la potencia máxima de aire acondicionado.

Cabe destacar que la temperatura de componentes en este caso se mantiene cercana a los 30 [°C]. Aunque esta debería tender a seguir bajando para un viaje de mayor duración, es importante notar que la temperatura de componentes solo llega a ser un par de grados menor que la temperatura externa.

Al mismo tiempo, la temperatura final llega solo a 27 [°C], presentando incluso una mayor diferencia con la temperatura de confort que en el caso donde la diferencia de temperaturas inicial es mayor. Este punto tiene sentido tomando en cuenta que parte de la definición matemática de la constante de tiempo, involucra la diferencia de temperatura inicial con la temperatura de confort (Ecuación 4.31). De esta forma, seleccionar una temperatura de confort más cercana a la temperatura inicial es equiparable a aumentar la variable de respuesta temporal, solo que esta variación no será directa producto del término logarítmico.

Para el siguiente caso modificado, se elevan todas las temperaturas iniciales del sistema 5[°C], simulando por ejemplo, un caso en que el auto está estacionado al sol justo antes de iniciar el viaje. Se espera un mayor consumo por aire acondicionado al mantener la temperatura de confort en 20 [°C].

Respecto al viaje con condiciones iniciales aumentadas, se cumple con que esto genera un consumo energético mayor, con una diferencia de 0,003 [kWh], es decir, un aumento tan solo del 1,1 %. Esto se evidencia en la Tabla 5.2 y es apoyado por la Figura 5.25, en donde se ve que la gráfica de consumo energético, solo presenta un mayor peak inicial en relación al caso anterior (Figura 5.1).

Lo planteado anteriormente se verifica debido a que al haber una alta temperatura inicial en el vehículo, debe eliminarse una mayor carga térmica producto de la inercia térmica de la masa de aire. Este cambio en la temperatura inicial se muestra en la Figura 5.25, en donde se ve una gráfica que parte de un valor mayor de temperatura, haciendo la curva más pronunciada en la primera parte (antes de los 400 [s]).

Por último respecto a este caso, vale la pena destacar que la temperatura final alcanzada en la cabina es menor que en el caso normal, incluso cuando la temperatura inicial es mayor. Esto tiene perfecto sentido considerando que la definición de las constantes de tiempo depende de la diferencia de temperaturas iniciales entre $T_{i,0}$ y T_{conf} , y a una mayor diferencia de temperatura inicial, la tasa de cambio de temperatura será mayor también, lo que explica una menor temperatura final en la misma cantidad de tiempo. Ahora bien, esta diferencia es comparativamente pequeña debido al carácter logarítmico presente en la ecuación de definición para t_p y $t_{constant}$.

La gráfica para la simulación de viaje nocturno mostrada en la Figura 5.26 muestra una carga AC de carácter casi constante. Esto se explica debido a que la temperatura externa es fijada artificialmente a 17,05 [°C], al igual que todas las temperaturas iniciales. Además, la radiación difusa y directa son eliminadas, por lo que las cargas térmicas por radiación dejan de aportar al problema, manifestándose a la vez en un consumo energético menor, y una potencia AC más baja que todos los otros casos (Tabla 5.2).

Esta falta de radiación también se aprecia en la Figura 5.27, en donde se ve que los componentes ya no presentan fluctuaciones de temperatura como las vistas anteriormente. Recordar que la carga térmica que

aporta calor a los componentes corresponde justamente a la de radiación, y al ser eliminada, la temperatura de los componentes queda sometida al valor de la temperatura del aire en la cabina. De esta forma, los componentes se transforman en un sistema acoplado al aire, comportándose como otro volumen que aporta a la inercia térmica de la cabina.

En el caso del viaje frío, la Tabla 5.2 muestra en primer lugar que la potencia tiene un valor positivo, es decir, este caso requiere ingresar calor al sistema, a diferencia de todos los casos anteriores de refrigeración. Es posible además apreciar perturbaciones en los mismos instantes de tiempo que en el caso original (Figura 5.28 y 5.1), por lo que se adjudica este comportamiento a las características del viaje y la radiación.

Por otro lado, en la Figura 5.29, se ve como la temperatura crece rápidamente de -3 a cerca de los 15 [°C] en los primeros 100 segundos. Este gran cambio en pocos segundos es nuevamente explicado por la definición del cambio de temperatura en cada paso de tiempo, basado en la diferencia entre la temperatura de confort y temperatura inicial de la cabina.

La temperatura de los componentes muestra un comportamiento similar al del caso anterior, basado en el bajo nivel de radiación incidente, y por ende en la baja perturbación energética que significa la entrada de radiación para calentar los componentes. De esta forma, toda la cabina se comporta de forma similar al caso anterior.

Es interesante además rescatar algunas curvas de la Figura 5.28, poco después de los segundos 600 y 800, en donde la carga AC por momentos se vuelve negativa. Este se explica al ver la Figura 5.2, en donde en esos momentos se producen bajas importantes en la velocidad, disminuyendo el coeficiente convectivo externo, y por ende el intercambio térmico entre el interior y el exterior. Disminuir el intercambio térmico entre el interior y el exterior reduce por momentos la salida de calor desde la cabina, y resulta en una acumulación instantánea de energía, la cual debe ser contrarrestada por aire acondicionado.

Finalmente la Figura 5.30 muestra como varía el consumo neto del viaje frío al variar la temperatura inicial. Anteriormente, solo se ha usado el valor de consumo energético absoluto del sistema, eliminando de la discusión la diferencia entre calefacción y refrigeración. Sin embargo, los valores positivos y negativos de la carga térmica se evidencian en los gráficos de AC en función del tiempo, y parece lógico creer que bajo ciertas condiciones, la energía suministrada será igual a la energía removida del sistema (como una sumatoria a través de todo el viaje).

La Figura 5.30 muestra justamente que lo anterior se produce para una temperatura externa de unos 7 [°C] (temperatura inicial de la cabina definida en función de esta temperatura externa). Además la curva presenta un pequeño relajo en el cambio del consumo en torno al valor de la temperatura de confort. Esto se produce debido a que en este caso la diferencia de temperatura se vuelve muy pequeña, y la definición logarítmica de las constantes de tiempo arroja valores muy similares, volviendo los fenómenos similares, y con un consumo energético neto de poca variabilidad de caso a caso.

Esto demuestra además que el caso de menor consumo neto no corresponde al caso donde la temperatura inicial es igual a la temperatura de confort. Si bien esto cumpliría las condiciones iniciales para un bajo consumo, el efecto de las cargas térmicas externas desequilibra una vez más al sistema en el tiempo, requiriendo el consumo de aire acondicionado. Esto es apoyado por el caso en donde se aumentan las temperaturas ini-

ciales del sistema, donde este valor mayor en un instante de tiempo inicial solo altera el consumo energético en un primer momento, pero esta condición no basta para afectar de manera importante el consumo total de energía a lo largo de todo el viaje.

Es posible extender el concepto anterior a porcentajes del viaje. Esto quiere decir que una condición de temperaturas o cargas térmicas afectará al sistema en mayor medida manteniéndose en el tiempo, de forma significativa en comparación al tiempo de viaje.

6.3. Análisis sobre la relación con el consumo total del vehículo

En la Tabla 5.4 es posible ver los resultados para la comparación del consumo energético de cada viaje en relación al consumo del vehículo. Debido a la diferencia en los estados de carga (SOC) de igual valor para el caso del viaje de abril y enero, el consumo energético del vehículo se supone constante de caso a caso, y de valor igual a 1,12 [kWh]. Esto permite diferenciar entre casos basado solamente en el consumo AC, pero el análisis es extensible a los valores de porcentaje de consumo para cada valor COP utilizado.

En primer lugar, se tiene que el caso de enero presenta un consumo energético menor, cosa que ya fue apoyada en el análisis de la primera sección de resultados. De esta forma, el consumo en enero presenta el 24% del consumo total del vehículo, y para el caso de abril un 21,3%. Estos casos normales conversan en términos porcentuales con el 21% especificado por [20], pero distan un poco de lo especificado por [8] respecto al 12%. Es necesario de todas formas tener claro que una comparativa porcentual solo entrega una referencia para el orden de los valores que deben obtenerse, ya que el consumo del viaje dependerá de los parámetros ambientales y las decisiones tomadas en la construcción del modelo en específico, el cual será siempre solo una representación de los efectos reales.

Por otro lado comparando los casos fríos con [8], se tiene que el consumo en ambos casos se estabiliza en un valor cercano a los 500 [W], salvo que el caso de Fayazbakhsh el valor es de mayor magnitud, y presenta mayor estabilidad. Esta estabilidad se debe al hecho de que las cargas por radiación presentan mucha menor variabilidad en su caso, debido a que no considera la dirección del vehículo para ponderar la radiación incidente en cada superficie, lo que sujeta las variaciones en las cargas térmicas solo a variaciones de las condiciones ambientales.

En la misma línea, los valores mayores obtenidos por Fayazbakhsh en consumo para viaje de calefacción y refrigeración necesitarían de valores mucho mayores de consumo del vehículo para mantener el valor de 12% especificado en el principio de su investigación bibliográfica. Se mantiene al igual que en este trabajo, un consumo mayor para casos de refrigeración en comparación al de calefacción.

Es importante además mencionar dos diferencias cruciales con la investigación de Fayazbakhsh. La primera es el uso de una carga por ventilación dada por recambio de aire, la cual no se consideró para efectos de este trabajo, y que según la investigación planteada por el referente, es la segunda más importante después de la radiación directa (en caso calefacción). Se propone incluir estos efectos para trabajos futuros que puedan desprenderse de esta memoria, lo que quizás equipararía los niveles de consumo con los Fayazbakhsh, al considerar el efecto del cambio en la humedad del aire y su aporte como carga latente.

La segunda diferencia importante corresponde a separar la cabina en dos sistemas inerciales y térmicamente distintos, tomando la idea desarrollada por Marcos [21]. Esto conlleva una carga por radiación de menor magnitud debido a que para este caso se considera que la radiación impacta sobre las superficies interiores del vehículo, y no que calienta el aire inmediatamente como lo asume Fayazbakhsh.

Finalmente, se desprende también de la Tabla 6.1 que el valor del coeficiente de desempeño puede tener un impacto considerable en el porcentaje de consumo del aire acondicionado (o calefacción) en relación al total del vehículo, cambiando su magnitud de un 42,6% a un 7,83% solo al varía el COP de 0,5 a 2,72 (caso abril). De todas formas, este valor de COP dependerá justamente de los fenómenos en conjunto con la naturaleza del hardware del sistema de climatización, por lo que una vez estudiado el sistema del vehículo en particular, sería posible entrar en detalle en este ámbito.

Lógicamente, un mayor consumo energético representa un mayor porcentaje de consumo respecto al total del vehículo, por lo que se rescata como dicho consumo puede variar desde un 6,5 a un 28% solo basado en las condiciones ambientales. De esta forma, se confirma la importancia del aumento en la temperatura y la radiación ambiental para el consumo de este tipo de tecnología.

Se destaca en la misma línea el consumo más de dos veces mayor que presentan todos los casos de refrigeración en comparación al caso de calefacción, sin considerar tampoco la diferencia que pueda existir entre la eficiencia del sistema de refrigeración y calefacción, que también escapa de los alcances de este trabajo.

6.4. Análisis del tiempo de ejecución

Para finalizar, se tiene que el tiempo de ejecución es mayor para el primer viaje, debido a que presenta una mayor cantidad de datos de pasos de tiempo. De acuerdo a esta forma de comparación, y teniendo en cuenta que los datos tenían una cantidad de pasos de tiempo de 214, 178 y 182 respectivamente, se obtiene una capacidad de procesamiento de 110,3, 95,2 y 101,7 pasos de tiempo procesados por segundo.

Promediando los valores anteriores, se obtiene una capacidad de procesamiento promedio de 102 pasos de tiempo por segundo. Si se mantiene una tasa de adquisición de datos cada 5 [s], y suponiendo una relación lineal entre el tiempo de ejecución y el número de datos, se tiene que el algoritmo podría procesar 8 minutos y medio (510 [s]) de viaje por cada segundo de ejecución del modelo.

Capítulo 7

Conclusiones

Respecto al objetivo principal de este trabajo, fue posible desarrollar una herramienta computacional que mediante un modelo térmico, fue capaz de estimar el consumo energético por climatización para un vehículo eléctrico. Esto se realizó para tres viajes distintos, además de analizar las variaciones en las distintas gráficas respecto a factores ambientales, y los supuestos físicos del modelo mismo.

Se analizaron también algunos parámetros de entrada del modelo, con el objetivo de que manteniendo constantes los datos ingresados, fuese posible concluir acerca del comportamiento del modelo. Tanto esta como las ejecuciones anteriores fueron realizadas satisfactoriamente.

El modelo térmico se desarrolló utilizando el lenguaje *Python*, y por ende, se cumple la condición de desarrollar una herramienta de acceso libre. A esta herramienta, es posible ingresarle datos externos y predecir el consumo energético para los datos entregados mediante un modelo de transferencia de calor. Además, la herramienta se construyó como un algoritmo flexible que permite variar las características del vehículo a analizar para una tipología base de polígono.

Respecto a conclusiones destacables de la sección de análisis, se tiene en primer lugar que el modelo refleja los parámetros físicos detrás del problema, y se evidencian comportamientos esperados explicados con el debido respaldo de las ecuaciones y supuestos físicos del modelo térmico.

Respecto a lo esperado, se desprende de los resultados que mayores niveles de radiación o temperatura ambiente conllevan mayores niveles de consumo por climatización a temperaturas más bajas, caracterizándose también la evolución desde las condiciones iniciales a una temperatura deseada. La carga por climatización responde también a la orientación del vehículo, debido a la variación que conlleva dicho cambio de orientación en el valor de la incidencia de la radiación directa en cada superficie.

Se destaca además, la fuerte dependencia de la temperatura de componentes y su carga convectiva, con los valores de radiación ingresados al modelo para cada rango horario. Respecto a esto mismo, se propone como trabajo la generación de valores de radiación interpolados entre horas, con el objetivo de generar un conjunto de datos variables por minuto. Esto eliminaría los cambios bruscos en las condiciones ambientales, permitiendo analizar de mejor manera los resultados del modelo.

Se destaca la importancia de la hora del día en que se realiza un viaje debido a los niveles de radiación

que se presentan a cada hora, y la incidencia en cada superficie que se produce por medio del cambio en la altura solar. Un ejemplo de esto fueron los niveles similares de consumo para enero y marzo, solo por el hecho de que el viaje de marzo se produjo en la ventana de tiempo de las 16:00 [hrs], y el viaje de enero entre 17:00 y 18:00 [hrs].

En cuanto a la variación de parámetros realizada, se concluye que el ingreso de una temperatura deseada 5 [°C] más baja, aumenta de manera importante el consumo energético total del viaje, al rededor de un 18,4%. Por otro lado el aumento de esa temperatura deseada en 5 [°C], permitió un ahorro del 15,8% de la energía con respecto al caso base.

Las valores expuestos anteriormente son de gran importancia, ya que permiten iniciar la discusión de la necesidad de establecer temperaturas de climatización tan distintas a la temperatura ambiente. Más aún, esta capacidad de variar la temperatura de confort es lo que permite específicamente calcular el consumo energético de la climatización, y tener esta herramienta permitiría realizar una gestión inteligente de la energía para disminuir el consumo por climatización.

Aún así, estos valores presentan solo una validez teórica respecto a lo esperado bajo ciertas condiciones, y sería bueno poder medir el consumo energético para estos viajes a fin de comparar los valores de predicción con valores reales. Realizar esta comparación permitiría saber las ventajas del modelo en términos de funcionamiento y versatilidad.

Se propone como trabajo futuro, realizar un ajuste polinomial (u otro) al modelo térmico, con el objetivo de buscar la máxima correlación de los datos medidos con los predichos. Este ajuste podría establecerse dependiente del caso, del rango de temperaturas u otras variables importantes en el problema, tal como se obtienen las correlaciones para, por ejemplo, números adimensionales u otros fenómenos relacionados al área de termo-fluidos.

Está de más decir, que dicho ajuste debe considerar además, características del sistema de aire acondicionado en específico utilizado por el vehículo, a fin de agregar factores relacionados al prototipo real, en su desempeño tanto eléctrico como mecánico (COP).

Otro aspecto interesante extraído del análisis, es el desempeño del algoritmo que produce los valores de la temperatura de la cabina para el paso de tiempo siguiente, como también la variable de tiempo de respuesta del sistema. Al estar definidas en función de la temperatura de confort, la temperatura inicial y la temperatura del paso de tiempo actual en la cabina, el comportamiento de dicha temperatura será siempre asintótico hacia el valor de confort, limitando la diferencia de temperaturas, y no la capacidad del sistema de aire acondicionado (su potencia).

Si bien estas relaciones matemáticas permiten al modelo evolucionar, replicando lo que sería el estado transiente de la climatización, se considera poco realista, en comparación a por ejemplo, limitar la capacidad del consumo de aire acondicionado con una relación lógica. Si bien, estos aspectos dependerán de la programación y el software del sistema de aire acondicionado utilizado, se propone como trabajo futuro el estudio en mayor detalle del cálculo de todas las variables relacionadas a esta parte del algoritmo en particular.

Se destaca también lo comparativamente mayor que es el consumo energético de refrigeración en com-

paración al de calefacción, en donde diferencias de temperaturas de mayor magnitud producen menores consumos para casos de calefacción, solo por el hecho de que las cargas térmicas de radiación y metabólicas están constantemente agregando energía al sistema. Esto es importante incluso antes de considerar las diferencias de hardware que pueda tener cada tipo de sistema, y sus respectivos coeficientes de desempeño.

De la misma forma, se rescata el hecho de que una condición inicial con temperatura igual a la temperatura de confort, no implica un consumo mínimo del sistema de aire acondicionado, debido a que las cargas térmicas desequilibran rápidamente el sistema solicitando una intervención de una carga térmica auxiliar (AC) para estabilizarlo. Más aún, la imposición de condiciones desfavorables solo tendrá un papel importante en la medida del consumo del viaje, si la permanencia de estas condiciones involucra un fracción importante del tiempo del viaje.

Respecto a la comparación con trabajos anteriores, se rescata que el porcentaje de consumo por AC respecto al total del vehículo ronda el 20% al igual que lo mencionado por [20]. Las diferencias con el modelo de Fayazbakhsh se mantienen en el mismo orden de magnitud, y se plantean razones para la variación de los resultados, basadas en condiciones como la ubicación geográfica, el COP implícito, y condiciones del modelo como el cambio de dirección incorporado en este trabajo, la inercia térmica separada que representa los componentes de la cabina, y la carga térmica por ventilación no incorporada en este trabajo, y que según los resultados de Fayazbakhsh tiene un carácter no despreciable.

Por otro lado, los resultados de los tiempos de ejecución se consideran buenos teniendo en cuenta que la capacidad de procesamiento del algoritmo se acerca al procesamiento de 8 minutos y medio de viaje para un segundo de ejecución. Esto permitiría obtener datos de consumo de una hora en el rango de 8 segundos, lo que se considera suficiente para efectos de este modelo, enmarcando el desarrollo de la herramienta para un futuro análisis en tiempo real. Con estos resultados generales, se dan por cumplidos los objetivos y alcances de este trabajo de título.

Con todo lo anterior, es importante destacar que la gestión de recursos como los sistemas de aire acondicionado y climatización, prueba ser importante si se busca disminuir el consumo energético manteniendo el confort del usuario. Tanto este modelo como otros generados anteriormente, presentan imprecisiones debido a simplificaciones que facilitan enormemente la resolución matemática del problema, y será tarea de quienes continúen desarrollando estas herramientas el poder captar de mejor manera la complejidad de los fenómenos físicos más relevantes. Solo así se podrá dar predicciones suficientemente buenas para mejorar la gestión informada de estos recursos.

Bibliografía

- [1] N. Stern *et al.*, “Stern review: La economía del cambio climático,” *HM Treasury. Disponible en <http://www.catedracambioclimatico.uji.es/docs/informestern.pdf>*, consultado el, vol. 11, 2007.
- [2] Nasa, “Análisis de nasa y noaa revelan que 2019 fue el segundo año más cálido registrado,” 2017.
- [3] Mitigation and energy: Working Group COP25 Chile, “Chilean ndc mitigation proposal: 2 methodological approach and supporting ambition,” 2019.
- [4] C. N. de Energia Gobierno de Chile, “Modelo de proyección: Demanda energética nacional de largo plazo,” 2009.
- [5] G. d. C. Coordinación de Planificación y Desarrollo, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, “Información de transporte urbano en ciudades de Chile periodo 2010 - 2015,” 2016.
- [6] F. Richter, “Electric mobility: Europe races ahead,” 2021.
- [7] M. Lambert and B. Jones, “Automotive adsorption air conditioner powered by exhaust heat. part 1: conceptual and embodiment design,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 220, no. 7, pp. 959–972, 2006.
- [8] M. A. Fayazbakhsh and M. Bahrami, “Comprehensive modeling of vehicle air conditioning loads using heat balance method,” *SAE technical paper*, vol. 2013, p. 1507, 2013.
- [9] H. M. Kamar, M. Y. Senawi, and N. Kamsah, “Computerized simulation of automotive air-conditioning system: development of mathematical model and its validation,” *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 9, no. 2, p. 23, 2012.
- [10] A. Handbook, “Fundamental american society of heating,” *Refrigeration and Air Conditioning Engineer, SI Edition*, 2005.
- [11] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, “Heat and mass transfer: fundamentals and applications. 2014.”
- [12] Y. Zheng, B. Mark, and H. Youmans, “A simple method to calculate vehicle heat load,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2011.
- [13] R. Román, “Ecuaciones fundamentales de radiación solar y posición del sol,” 2018.
- [14] A. O. García, “Gráficas de recorridos solares,” Consulta: 22 enero del 2022.
- [15] X. F. L. C. Y. C. Zhenying Zhang, Jiayu Wang and X. Wang, “The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review,” tech. rep., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [16] Hyundai, “Manual del propietario hyundai ioniq hybrid 2019,” 2019.
- [17] I. Cvok, B. Škugor, and J. Deur, “Control trajectory optimisation and optimal control of an electric

vehicle hvac system for favourable efficiency and thermal comfort,” *Optimization and Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 83–102, 2021.

- [18] Hyundai, “Manual de taller hyundai ioniq hybrid 2019,” 2019.
- [19] H. A. T. Center, “Request for ghg credit for hanan a/c compressor with variable orifice valve technology,” 2019.
- [20] V. Johnson, “Fuel used vehicle air conditioning: A state-by-state thermal comfort-based approach,” *National Renewable Energy Laboratory*, 2002.
- [21] D. Marcos, F. J. Pino, C. Bordons, and J. J. Guerra, “The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1-2, pp. 646–656, 2014.
- [22] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley New York, 1980.
- [23] J.-H. Lim, Y.-S. Lee, and Y.-B. Seong, “Diurnal thermal behavior of photovoltaic panel with phase change materials under different weather conditions,” *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 1983, 2017.
- [24] J. Arregui, I. Les, and A. Mutuberria, “Impact of incident angle dependent optical properties and dirtiness on the optical performance of parabolic trough collectors,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2126, p. 120002, AIP Publishing LLC, 2019.
- [25] BMW, “Diseño y rendimiento bmw m135i xdrive,” Consulta: 13 mayo del 2022.

Anexo A

Tablas de datos ambientales

A.1. Datos 20 de enero de 2020

Tabla A.1: Datos ambientales para el día 20 de enero de 2020.

Hora del día [Hr]	Radiación directa [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura [°C]	Velocidad del viento [m/s]
0	0,00	0,00	16,01	0,44
1	0,00	0,00	15,47	0,22
2	0,00	0,00	14,80	0,10
3	0,00	0,00	14,20	0,12
4	0,00	0,00	13,68	0,16
5	0,00	0,00	13,17	0,27
6	0,00	0,53	14,37	0,16
7	15,86	37,82	15,78	0,10
8	224,05	56,81	18,12	0,39
9	447,18	71,20	20,55	0,85
10	647,06	82,47	23,33	1,22
11	801,44	90,63	25,96	1,89
12	895,46	95,44	28,31	2,47
13	921,71	96,76	30,02	3,09
14	878,43	94,54	29,06	3,27
15	769,42	88,93	27,85	3,23
16	604,17	80,08	26,81	3,16
17	398,08	68,17	25,53	3,03
18	174,73	52,95	24,03	2,69
19	0,00	32,41	22,02	2,24
20	0,00	0,00	19,76	1,64
21	0,00	0,00	18,29	1,21
22	0,00	0,00	17,05	0,90
23	0,00	0,00	15,85	0,56

A.2. Datos 05 de marzo de 2020

Tabla A.2: Datos ambientales para el día 05 de marzo de 2020.

Hora del día [Hr]	Radiación directa [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura [°C]	Velocidad del viento [m/s]
0	0,00	0,00	17,46	0,36
1	0,00	0,00	16,70	0,26
2	0,00	0,00	16,09	0,30
3	0,00	0,00	15,59	0,40
4	0,00	0,00	15,21	0,49
5	0,00	0,00	14,82	0,49
6	0,00	0,00	14,22	0,53
7	9,37	18,49	13,72	0,40
8	205,33	44,87	15,81	0,47
9	4,35	33,36	18,03	0,86
10	642,63	73,29	19,98	1,02
11	803,30	81,92	22,15	1,86
12	24,89	581,89	24,12	2,00
13	9,32	316,97	25,17	2,49
14	887,85	86,35	25,86	2,81
15	776,23	80,53	25,49	3,06
16	605,10	71,20	24,79	3,09
17	391,23	58,31	23,60	2,90
18	161,87	40,88	22,25	2,52
19	0,00	8,96	20,46	2,02
20	0,00	0,00	19,05	1,48
21	0,00	0,00	17,75	1,15
22	0,00	0,00	16,92	1,00
23	0,00	0,00	16,22	0,90

A.3. Datos 01 de abril de 2020

Tabla A.3: Datos ambientales para el día 01 de abril de 2020.

Hora del día [Hr]	Radiación directa [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura [°C]	Velocidad del viento [m/s]
0	0,00	0,00	13,99	0,64
1	0,00	0,00	13,25	0,56
2	0,00	0,00	12,67	0,67
3	0,00	0,00	12,25	0,45
4	0,00	0,00	11,93	0,46
5	0,00	0,00	11,62	0,50
6	0,00	0,00	11,12	0,41
7	0,00	0,11	10,10	0,38
8	2,13	29,48	11,35	0,25
9	4,51	60,78	13,38	0,39
10	6,61	101,90	16,09	0,63
11	8,19	226,73	18,25	1,13
12	909,43	80,95	20,49	1,62
13	928,60	81,92	22,37	2,09
14	874,19	79,11	23,49	2,53
15	749,93	72,52	23,27	2,77
16	567,37	62,22	22,46	2,89
17	343,03	47,76	21,01	2,78
18	105,17	25,52	18,56	2,27
19	0,00	0,00	16,69	1,56
20	0,00	0,00	15,19	0,97
21	0,00	0,00	14,07	0,69
22	0,00	0,00	13,36	0,47
23	0,00	0,00	12,78	0,40

Anexo B

Datos del vehículo Hyundai Ioniq 2019

CAPACIDAD DE CARGA Y VELOCIDAD DE LOS NEUMÁTICOS

Elemento	Tamaño de los neumáticos	Tamaño de la rueda	Capacidad de carga		Capacidad de velocidad	
			LI *1	kg	SS *2	km/h
Neumático de tamaño completo	195/65 R15	6,0J X 15	91	615	H	210
	205/55 R16	6,5J X 16	91	615	H	210
	225/45 R17	7,0J X 17	91	615	W	270
Neumático de repuesto compacto (opcional)	T125/80 D15	4,0T X 15	95	690	M	130
	T125/80 D16	4,0T X 16				

*1 LI : ÍNDICE DE CARGA

*2 SS : SÍMBOLO DE VELOCIDAD

SISTEMA DEL AIRE ACONDICIONADO

Elemento	Peso del volumen	Clasificación
Refrigerante	g (oz.) 600±25 (21,16±0,88)	R-1234yf (Para Europa) R-134a (Excepto Europa)
Lubricante del compresor	g (oz.) 130±10 (4,58±0,35)	POE

Para más información, recomendamos que se ponga en contacto con un distribuidor HYUNDAI autorizado.

PESOS/VOLUMEN

Peso bruto del vehículo kg (lbs.)		Volumen del maletero / (pies cub.)			
Vehículo híbrido	Vehículo híbrido enchufable	Vehículo híbrido		Vehículo híbrido enchufable	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1.870 (4.122)	1.970 (4.343)	563 (19,9)	1.518 (53,6)	446 (15,8)	1.401 (49,5)

Mín. : Detrás del asiento trasero hasta el techo.

Máx. : Detrás del asiento delantero hasta el techo.

Figura B.1: Datos del sistema de refrigeración, velocidades y pesos máximos, entre otros [16].

Anexo C

Vistas del polígono del vehículo

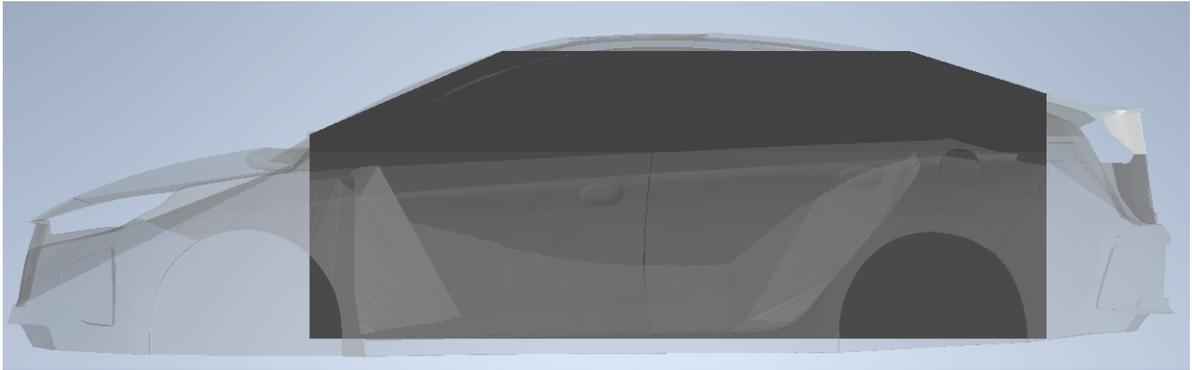


Figura C.1: Modelo simplificado y polígono creado para el vehículo, vista lateral.

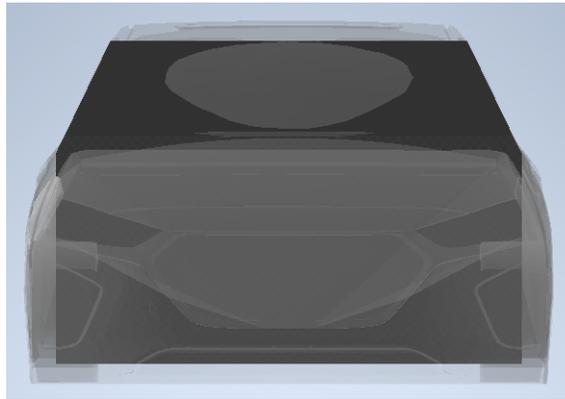


Figura C.2: Modelo simplificado y polígono creado para el vehículo, vista frontal.

Anexo D

Dimensiones vehículo *BMW 1*

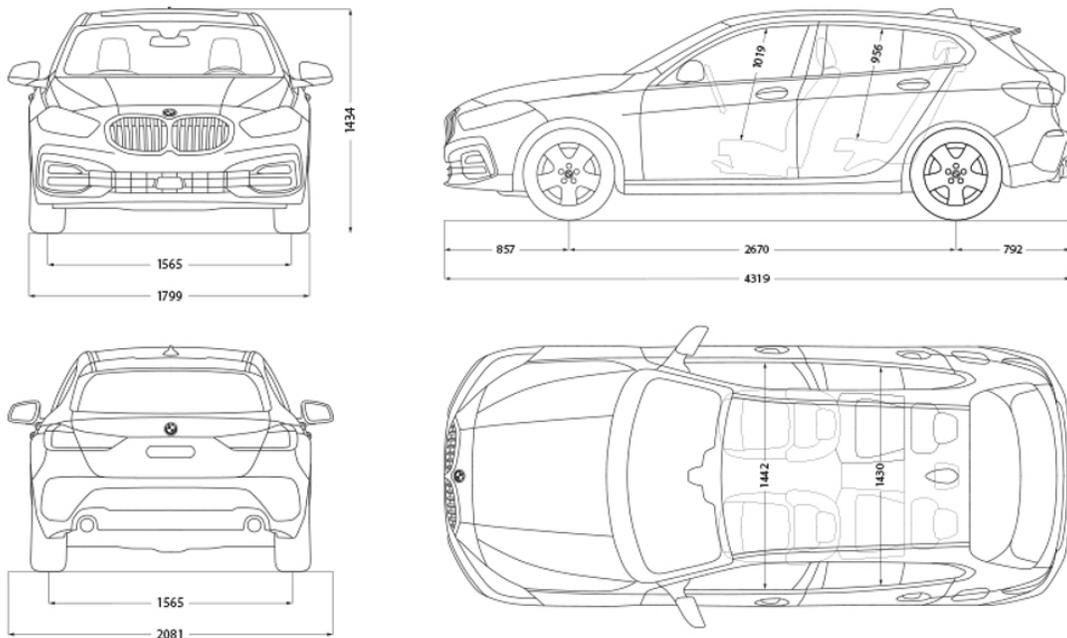


Figura D.1: Dimensiones del vehículo de referencia para masa y calor específico de componentes [25].