



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

ANÁLISIS DINÁMICO DEL CONSUMO ENERGÉTICO POR CONFORT TÉRMICO DE LA CABINA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

CONSUELO JAVIERA OCARANZA CISTERNAS

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE REYES MARAMBIO
PAULINA RAMIREZ DEL BARRIO

SANTIAGO DE CHILE

2022

ANÁLISIS DINÁMICO DEL CONSUMO ENERGÉTICO POR CONFORT TÉRMICO DE LA CABINA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN CHILE

El siguiente trabajo corresponde a una estimación del impacto de la temperatura ambiente y la velocidad en la carga térmica y consumo energético necesario, para mantener la cabina de un vehículo eléctrico en Chile, dentro de un rango de confort térmico.

Un vehículo eléctrico es aquel que es propulsado por energía eléctrica. Esta energía es almacenada en baterías que se encargan de alimentar el motor del vehículo y los consumos auxiliares de este. Entre estos consumos auxiliares, el que más destaca es el sistema de climatización, debido a que es el que presenta mayor consumo de energía, generando un gran impacto en la autonomía y eficiencia energética total del vehículo.

Para poder estimar el impacto de los parámetros de estudio, se confecciona un modelo basado en las cargas térmicas de la cabina. Este es comparado con otro representado por una ecuación lineal que tiene como única variable la temperatura ambiente. Para poder realizar esto, se considera que la cabina se mantiene en un rango de confort dado por una temperatura promedio del habitáculo de 24°C. El modelo es aplicado a datos obtenidos mediante telemetría de viajes realizados por el vehículo Hyundai Ioniq 2019 BEV dentro de la ciudad de Santiago. Estos viajes se dividen en viajes de ruta similar y un viaje de ruta larga. El modelo se implementa en Excel y la representación de resultados se realiza mediante el uso del lenguaje de programación Python, utilizando la plataforma Jupyter Notebook.

Finalmente, analizando los resultados obtenidos se concluye que, para viajes realizados en horarios con presencia de radiación térmica, el incremento de la velocidad aumenta la convección externa y por ello la salida de calor desde las superficies de la cabina. Ocurre lo contrario para viajes realizados en horarios nocturnos, donde el aumento de la velocidad genera una entrada de calor, incrementando la carga de climatización. En relación con el efecto de la temperatura ambiente, se concluye que, para viajes realizados en el mismo rango horario, frente a un aumento en la temperatura, el consumo energético crece, pero en diferentes proporciones cuando la diferencia de temperatura entre viajes varía. Para ver si esta tendencia se mantiene es importante aplicar este modelo a más viajes. El porcentaje del consumo energético destinado a climatización aumenta a medida que la temperatura ambiente lo hace, y este se mantiene entre un 3% y 30% del consumo total. Lo mismo se puede concluir respecto a las métricas de eficiencia, a medida que disminuye la temperatura ambiente entre viajes de ruta similar, la eficiencia del sistema HVAC aumenta. Finalmente se concluye que estos resultados permiten obtener información de consumos destinados a climatización para distintos viajes, permitiendo conocer cuánto consumiría un viaje bajo condiciones similares.

Enciende la llama de tu corazón

Kyojuro Rengoku

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia, el pilar fundamental en mi vida. A mi papa, mis hermanas y mis peludites, por el apoyo, amor, contención y confianza que depositaron en mi cuando decidí emprender el viaje que me trajo hasta acá. A mis tío y tías, primas y primos y mis padrinos, por el cuidado, protección y soporte que me dieron todos estos años que estuve lejos de mi hogar. A mis abuelos, por entregarme sus valores y cuidarme desde el lugar donde sea que sus almas hayan trascendido.

Y por último a mi madre, quien con su amor incondicional me entrega las fuerzas durante cada etapa y obstáculo que se presenta y que creyó en mi cuando ni yo era capaz de hacerlo.

A todos mis amigos, del colegio, bachi, universidad y la vida, por estar presente en cada momento, tanto buenos como malos. Quiero agradecer especialmente a mis frens, Roma, Valentina y Franco. También a Daniel y Lucho, que durante este último tiempo fueron la luz en los momentos más oscuros y me acompañaron, ayudaron y enseñaron tantas cosas que atesorare por siempre.

A mis doctoras Cecilia y Maria Alejandra, por darme las herramientas para poder superar cada problema, conocerme y crecer como persona día a día.

A todos los que me ayudaron a sacar adelante este trabajo de título. A Ignacio, Ana y Daniel, por el soporte y conocimientos que me entregaron para superar cada dificultad. Al profesor Williams, por las enseñanzas, apoyo y paciencia que tuvo todo este tiempo y que me permitió sacar adelante este desafío. A Jorge y Paulina, por entregarme de su tiempo y experiencia, siempre que lo necesité. Y a Claudia, por su gestión en cada momento que lo requerí.

A mis profesores, funcionarios y compañeros con los que me tope en este camino y me ayudaron y entregaron las mejores condiciones para poder desarrollar mi carrera.

Finalmente, quiero agradecer a la Consuelo del pasado, por no rendirse y enfrentar con valentía cada desafío que me trajo hasta donde estoy ahora.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcances	3
1.2.1. Alcances para los viajes seleccionados	3
1.2.2. Alcances para el modelo de cargas térmicas	3
2. Antecedentes	4
2.1. Vehículos eléctricos	4
2.1.1. Baterías	5
2.1.2. Sistema de gestión del vehículo	7
2.2. Vehículo parte del estudio	8
2.2.1. Motor sincrónico de imanes permanentes	10
2.3. Impacto de la climatización en vehículos eléctricos	10
2.4. Sistema de climatización de un vehículo eléctrico	12
2.4.1. Ciclo de compresión de vapor	14
2.4.2. Ciclo de refrigerante	15
2.5. Modelo lineal para estimación de potencia de aire acondicionado	15
2.6. Modelos de cargas térmicas para estimación de potencia de aire acondicionado	18
2.7. Transferencia de calor	23
2.7.1. Conducción	23
2.7.2. Convección	24
2.7.2.1. Convección natural	24
2.7.3. Radiación	26
2.7.3.1. Radiación solar	26
2.7.3.2. Ángulo de incidencia del haz de radiación solar sobre una superficie	27
3. Metodología	34
3.1. Selección de viajes	34
3.2. Recopilación de datos extras a la base de datos	36

3.2.1.	Obtención de datos desde el explorador solar	36
3.2.2.	Obtención de datos de temperatura ambiente	37
3.2.3.	Trazado de rutas y cálculo de distancia total	38
3.2.4.	Obtención de datos geométricos, termodinámicos y características de los materiales de la cabina	38
3.3.	Confección del modelo de cargas térmicas	38
4.	Creación de la geometría de la cabina	41
5.	Modelo térmico de la cabina	43
5.1.	Flujo de calor desde superficies opacas para un instante de tiempo: $\dot{Q}_{cvin,op}$.	44
5.2.	Flujo de calor en superficies transparentes en un instante de tiempo: $\dot{Q}_{cvin,t}$, $\dot{Q}_{rad\tau}$	47
5.3.	Coefficiente convectivo interno: h_i	50
5.4.	Coefficiente convectivo externo: h_e	51
5.5.	Flujo de calor metabólico: \dot{Q}_{met}	51
5.6.	Cálculo del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre cada superficie de la cabina	52
6.	Cálculo de resultados	55
6.1.	Cálculo del consumo energético por el sistema de climatización	55
6.2.	Cálculo del consumo energético total por viaje	55
6.2.1.	Cálculo del consumo energético total teórico por el sistema de tracción	56
6.3.	Porcentaje de energía consumida por el sistema de climatización	57
6.4.	Parámetros para medir eficiencia del sistema de climatización por viaje . . .	57
7.	Resultados	58
7.1.	Potencia de aire acondicionado en el tiempo de viaje	58
7.1.1.	Viajes con ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas	59
7.1.2.	Viajes con ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas	60
7.1.3.	Viaje ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas	61
7.2.	Variación de la potencia térmica de climatización a través del tiempo por cambios en la velocidad del vehículo	62
7.2.1.	Viajes con ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas	62
7.2.2.	Viajes con ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas	64
7.2.3.	Viajes con ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas	67
7.3.	Consumo energético por parte del sistema de climatización para cada viaje .	68
7.4.	Consumo energético total por viaje	70
7.4.1.	Consumo total utilizando ecuación de potencia de tracción	72
7.4.2.	Porcentaje del consumo destinado a climatización	72
7.5.	Métricas de eficiencia para el sistema de climatización	73

8. Análisis de resultados	75
8.1. Efecto de la temperatura ambiente en la potencia de climatización para cada viaje	75
8.2. Efecto de la velocidad en la potencia térmica de aire acondicionado para cada viaje	77
8.3. Consumo energético del sistema de climatización	78
8.3.1. Viajes con ruta similar	78
8.3.1.1. Convección natural	78
8.3.1.2. Convección media	79
8.3.1.3. Modelo lineal	79
8.3.1.4. Diferencia entre consumos para cada viaje por tipo de convección	80
8.3.2. Viaje de ruta larga	80
8.4. Consumo energético total por viaje	80
8.4.1. Porcentaje destinado a HVAC	81
8.5. Métricas de eficiencia para el sistema de aire acondicionado	82
9. Conclusiones	84
9.1. Trabajo a futuro	86
9.2. Mejoras al modelo	86
Bibliografía	88
Anexos	91
A. Trayectorias	91
B. Perfiles de velocidad	97
C. Distancias	99
D. Código	102

Índice de Tablas

2.2.1. Ficha técnica Hyundai Ioniq 2019 BEV. [9]	9
2.5.1. Distintas condiciones climáticas [7].	16
2.1. Fórmulas para estimación del día del año (nd) [30]	28
3.1.1. Parámetros extraídos desde la base de datos.	35
3.2.1. Longitud y latitud promedio para cada tipo de viaje.	36
3.2.2. Datos obtenidos desde el explorador solar para cada viaje.	37
3.2.3. Temperatura ambiente promedio para cada viaje.	37
3.2.4. Distancia total recorrida por cada viaje.	38
4.0.1. Parámetros geométricos obtenidos desde el polígono de la cabina.	42
5.1.1. Coeficientes de radiación absorbida para superficies opacas [24].	45
5.1.2. Dimensiones, conductividad térmica y resistencia equivalente para las distintas superficies opacas [24].	45
5.2.1. Coeficientes de radiación absorbida y transmitida para superficies transparentes [24].	48
5.2.2. Conductividad térmica y espesores para cada una de las superficies transparentes.	49
5.3.1. Propiedades del fluido y parámetros para el calculo del número de Grashof [36].	50
5.5.1. Tasa de calor metabólico, peso, altura, área de Dubois y carga metabólica final para chofer y pasajera [23], [37].	52
5.6.1. Ángulos respecto a la horizontal para cada una de las superficies de la cabina, en grados.	53
5.6.2. Valores de γ para cada una de las superficies, en grados	54
6.2.1. Parámetros para el calculo de potencia del sistema de tracción del vehículo [39], [38].	56
7.4.1. Consumo energético total por viaje y consumo destinado a tracción.	70
7.4.2. Consumo energético total y de tracción obtenido teóricamente.	72
7.3. Porcentaje del consumo total (calculado con la variación del estado de carga) destinado a climatización.	72
7.4. Porcentaje del consumo total (calculando el consumo por tracción) destinado a climatización.	73
7.5.1. Consumo energético del sistema de climatización por kilometro recorrido del vehículo.	73
7.5.2. Consumo energético del sistema de climatización cada 100 kilómetros recorridos del vehículo.	74

8.3.1. Aumento en el consumo energético por climatización al cambiar el tipo de convección dentro de la cabina.	80
---	----

Índice de Ilustraciones

2.1.1. Esquema básico de la estructura de un vehículo eléctrico. [4]	4
2.1.2. Estructura básica de algunos tipos de vehículos eléctricos. (a) HEV, (b) PHEV, (c) BEV y (d) FCEV. [5]	5
2.1.3. Diagrama de carga/descarga de la batería de ion-litio. [7].	6
2.2.1. Vista delantera y lateral del Hyundai Ioniq 2019. [10]	8
2.2.2. Vista trasera del Hyundai Ioniq 2019 [10]	8
2.2.3. Vehículo perteneciente a la flota de la empresa Transvip [11]	9
2.2.4. Esquema del estator y rotor de electroimanes [13].	10
2.3.1. TCO para el año 2015 y proyectado al año 2030, para vehículos eléctricos a batería, híbridos y de combustión interna, en distintos países alrededor del mundo [14].	11
2.3.2. Consumo anual de energía del sistema de climatización en diferentes ciudades de China [15].	12
2.4.1. Esquema del ciclo de aire acondicionado para un vehículo eléctrico [16].	13
2.4.2. Compresor eléctrico Hyundai 97701-G7000 [18].	13
2.4.3. Esquema del ciclo de compresión de vapor del sistema de climatización [20].	14
2.4.4. Esquema del sistema de HVAC para un vehículo estándar [19].	15
2.5.1. Evolución de la potencia de aire acondicionado frente a distintas condiciones climáticas [7].	17
2.6.1. Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Fayazbakhsh y Bahrami [23].	20
2.6.2. Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Marcos [24].	21
2.6.3. Polígono de la cabina propuesto por Fayazbakhsh y Bahrami [23].	21
2.6.4. Polígono de la cabina propuesto por Marcos [24].	21
2.6.5. Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Marcos [25].	22
2.6.6. Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Xie [16].	23
2.7.1. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente [28].	27
2.7.2. Esquema explicativo del ángulo de declinación solar [29].	29
2.7.3. Sistema de coordenadas celestes horizontales [29].	30

2.7.4.	Esquema del ángulo de incidencia del haz de radiación sobre una superficie arbitraria [29].	32
2.7.5.	Dirección de la medición del ángulo azimut de superficie.	33
3.0.1.	Esquema general de los pasos a desarrollar durante el trabajo.	34
3.3.1.	Esquema del proceso de iteración para el cálculo del coeficiente convectivo interno y temperaturas de superficie.	40
4.0.1.	Modelo 3D del vehículo Hyundai Ioniq 2019.	41
4.0.2.	Polígono de la cabina. (1) Parabrisas, (2) Ventanas laterales, (3) Ventana trasera, (4) Techo y (5) Puertas.	42
5.0.1.	Esquema del modelo térmico propuesto para las cargas térmicas de la cabina. .	44
5.1.1.	Esquema del balance térmico en superficies opacas.	46
5.2.1.	Esquema del balance térmico en superficies transparentes.	48
5.6.1.	Ejemplo de medición del ángulo azimut de superficie para la ventana derecha.	53
5.6.2.	Esquema resumen del procedimiento para el cálculo del ángulo de incidencia del haz de radiación solar en una superficie.	54
7.1.1.	Potencia de aire acondicionados durante el tiempo para el viaje del 20 de enero.	59
7.1.2.	Potencia de aire acondicionados durante el tiempo para el viaje del 1 de abril.	59
7.1.3.	Potencia de aire acondicionados durante el tiempo para el viaje del 27 de enero.	60
7.1.4.	Potencia de aire acondicionados durante el tiempo para el viaje del 10 de febrero.	60
7.1.5.	Potencia de aire acondicionados durante el tiempo para el viaje del 21 de febrero.	61
7.1.6.	Potencia de aire acondicionados durante el tiempo para el viaje del 24 de febrero.	61
7.2.1.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 20 de enero con CN dentro de la cabina.	62
7.2.2.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 20 de enero con CM dentro de la cabina.	63
7.2.3.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 1 de abril con CN dentro de la cabina.	63
7.2.4.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 1 de abril con CM dentro de la cabina.	64
7.2.5.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 27 de enero con CN dentro de la cabina.	64
7.2.6.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 27 de enero con CM dentro de la cabina.	65
7.2.7.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 10 de febrero con CN dentro de la cabina.	65
7.2.8.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 10 de febrero con CM dentro de la cabina.	66
7.2.9.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 21 de febrero con CN dentro de la cabina.	66
7.2.10.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 21 de febrero con CM dentro de la cabina.	67

7.2.11.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 24 de enero con CN dentro de la cabina.	67
7.2.12.	Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 24 de enero con CM dentro de la cabina.	68
7.3.1.	Consumo energético por el sistema de climatización para los viajes de ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas.	69
7.3.2.	Consumo energético por el sistema de climatización para los viajes de ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas.	69
7.3.3.	Consumo energético por el sistema de climatización para el viaje de ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas.	70
7.4.1.	Consumo energético total por viaje, dividido en cada sistema relevante del vehículo, considerando convección natural dentro de la cabina.	71
7.4.2.	Consumo energético total por viaje, dividido en cada sistema relevante del vehículo, considerando convección media dentro de la cabina.	71
A.1.	Recorrido para viaje del 20 de enero.	91
A.2.	Recorrido para viaje del 27 de enero.	92
A.3.	Recorrido para viaje del 10 de febrero.	93
A.4.	Recorrido para viaje del 21 de febrero.	94
A.5.	Recorrido para viaje del 1 de abril.	95
A.6.	Recorrido para viaje del 24 de enero.	96
B.1.	Perfil de velocidad viaje 20 de enero	97
B.2.	Perfil de velocidad viaje 27 de enero	97
B.3.	Perfil de velocidad viaje 10 de febrero	98
B.4.	Perfil de velocidad viaje 21 de febrero	98
B.5.	Perfil de velocidad viaje 1 de abril	98
B.6.	Perfil de velocidad viaje 24 de enero	99
C.1.	Distancia total recorrida por el viaje del 20 de enero.	99
C.2.	Distancia total recorrida por el viaje del 27 de enero.	100
C.3.	Distancia total recorrida por el viaje del 10 de febrero.	100
C.4.	Distancia total recorrida por el viaje del 21 de febrero.	101
C.5.	Distancia total recorrida por el viaje del 1 de abril.	101
C.6.	Distancia total recorrida por el viaje del 24 de enero.	102

Capítulo 1

Introducción

Chile, en los últimos años, ha adquirido acuerdos internacionales que tienen el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En este país, un tercio del consumo energético corresponde al sector del transporte y, dentro de este grupo, un 98 % se alimenta de fuentes energéticas derivadas del petróleo [1].

Por lo anterior, resulta necesario tomar medidas que busquen reemplazar a los vehículos de combustión interna por vehículos que se alimenten de matrices energéticas provenientes de energías renovables.

Actualmente, existe un incremento de los vehículos eléctricos (VE) que se alimentan de este tipo de matrices energéticas, lo que presenta una buena alternativa para el remplazo de los vehículos que poseen motor de combustión interna ICE (Internal Combustion Engine). Pero, a diferencia de los vehículos de combustión interna, los VE presentan costos de inversión considerablemente mayores, lo cual genera un obstáculo al momento de ingresar al mercado en Chile.

Sin embargo, su eficiencia y bajos costos operacionales [2] generan una oportunidad para justificar su inversión por sobre la competencia. En un ejercicio de comparación entre buses eléctricos y buses con motor ICE, se concluyó que los primeros tienen menores costos operativos y pueden ser más económicos en su adquisición y operación. Dentro de este mismo estudio, se estima que por cada 1000 autobuses eléctricos, se dejan de usar 500 barriles de petróleo al día [1].

Dentro de los costos operacionales se encuentra el costo asociado al consumo de batería, donde destaca el consumo de uno de los sistemas auxiliares más relevantes dentro del vehículo: el sistema de climatización o confort térmico de la cabina.

Estudios posicionan al sistema de climatización (HVAC: heating, ventilation and air conditioning) como el dispositivo auxiliar de mayor consumo de energía, generando alrededor

de un 33% de disminución promedio en la autonomía o rango de conducción del vehículo, afectando en consecuencia, a la eficiencia energética total de este [3].

Existen diversos parámetros o factores que, a través de su variación, pueden afectar en el aumento o disminución de la carga térmica total de HVAC necesaria para mantener a la cabina en una temperatura de confort. Estos parámetros se relacionan entre si mediante los distintos métodos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Entre estas variables destacan dos que se desarrollan fuera de la cabina del vehículo: la temperatura ambiente y la velocidad del vehículo.

Este trabajo se enfoca en el estudio de la dependencia entre el consumo energético del sistema HVAC y los parámetros mencionados anteriormente. Esto se realiza para distintos viajes de taxis eléctricos dentro de la ciudad de Santiago de Chile, permitiendo obtener información útil sobre los efectos de estas variables, generando que a futuro se puedan crear medidas que ayuden a gestionar de manera eficiente el sistema de climatización de los VE.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Estimar el impacto de la temperatura ambiente y la velocidad de un vehículo eléctrico en el consumo de energía por parte del sistema de confort térmico, para distintos viajes realizados en Santiago de Chile.

1.1.2. Objetivos específicos

- Confeccionar un modelo de cargas térmicas de la cabina de un vehículo eléctrico y estimar la carga de aire acondicionado necesaria para mantener la temperatura de confort térmico.
- Aplicar el modelo de cargas térmicas a distintos viajes obtenidos de una base de datos generada por telemetría.
- Utilizando el modelo de cargas térmicas y los datos de telemetría, estimar el consumo energético para cada uno de los viajes.
- Comparar los resultados del modelo de cargas térmicas con el modelo lineal para potencia de AC.
- Evaluar el efecto de la variación de la velocidad del vehículo en la carga térmica necesaria para mantener el confort de la cabina.
- Estimar la relación entre los cambios de temperatura ambiente por viaje y el consumo de energía destinada a climatización.

1.2. Alcances

Este trabajo de título corresponde a una investigación a mesoescala, estudiando el comportamiento del vehículo frente a la variación de parámetros externos a éste, sin considerar en detalle los fenómenos ocurridos dentro de la cabina. Esto, en otras palabras, significa que se toman simplificaciones las cuales son descritas en los alcances para el modelo de cargas térmicas. El modelo desarrollado en este trabajo es aplicado a viajes interurbanos, realizados desde puntos dentro de la ciudad de Santiago de Chile hacia puntos que se encuentran dentro y fuera del aeropuerto Arturo Merino Benitez.

1.2.1. Alcances para los viajes seleccionados

- Los viajes deben cumplir con los requisitos para viaje valido del informe de ruta sustentable.
- Viajes ruta similar: Comienzan desde la casa del conductor (bajo techo).
- Viaje ruta larga: Comienza desde un punto de la ciudad de Santiago, con una exposición previa a la radiación.
- Debido a las características de la ruta que siguen los viajes, se determina que siguen en todo momento una dirección de sur a norte.

1.2.2. Alcances para el modelo de cargas térmicas

- El modelo de cargas térmicas toma como referencia la cabina del vehículo eléctrico Hyundai Ioniq 2019 BEV (Battery Electric Vehicle o Vehículo eléctrico de batería). Debido a esto, se utilizan datos disponibles sobre este modelo y, en caso de que falte información necesaria para el correcto desarrollo del modelo, esta se extrae desde artículos científicos de referencia utilizados para confeccionar el modelo propuesto.
- Debido a que el objeto de estudio es la cabina del vehículo, se utiliza un polígono de esta que se asemeje lo más posible a la estructura de la cabina del modelo Hyundai Ioniq 2019 BEV. Además, esta se dividirá en superficies opacas y transparentes.
- Se utilizarán simplificaciones para los parámetros de entrada del modelo. Lo anterior se debe a que el modelo en debe adaptarse a las características que poseen los viajes obtenidos desde telemetría y debe ser comparado con un modelo lineal propuesto por otro autor para estimación del consumo de HVAC.

Capítulo 2

Antecedentes

A continuación, se abordan conceptos, modelos y simulaciones importantes para contextualizar el trabajo realizado.

2.1. Vehículos eléctricos

Una definición simple de un vehículo eléctrico es que este corresponde a un vehículo propulsado por energía eléctrica. Esto lo diferencia de un vehículo de combustión interna, el cual necesita de combustibles fósiles para el funcionamiento del motor. Un vehículo eléctrico (EV) utiliza un motor eléctrico el cual se alimenta por baterías. Esta energía pasa primero a un convertidor, el cual controla la potencia suministrada a los motores de accionamiento. Esta potencia eléctrica permite girar el eje de los motores eléctricos, el cual está acoplado a las ruedas del vehículo provocando el movimiento de este.

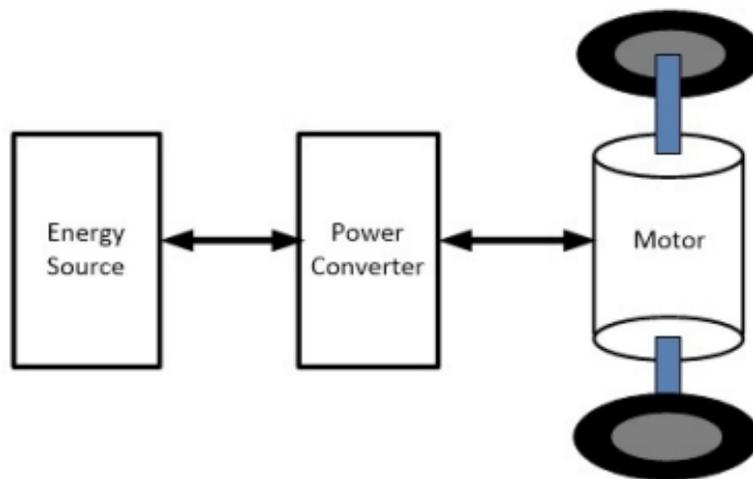


Figura 2.1.1: Esquema básico de la estructura de un vehículo eléctrico. [4]

Esquema básico de la estructura de un vehículo eléctrico Dependiendo de la fuente de energía [5], los vehículos eléctricos se clasifican en las siguientes categorías:

- BEV (Battery Electric Vehicle): Vehículos eléctricos cuya fuente de energía es una batería recargable por enchufe, que alimenta un motor eléctrico.
- HEV (Hybrid Electric Vehicle): Vehículos eléctricos híbridos, los cuales poseen un motor de combustión interna y baterías que no son enchufables.
- PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle): Vehículos híbridos que cuentan con baterías enchufables.
- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle): Vehículo eléctrico alimentado por celda de combustible de hidrógeno.

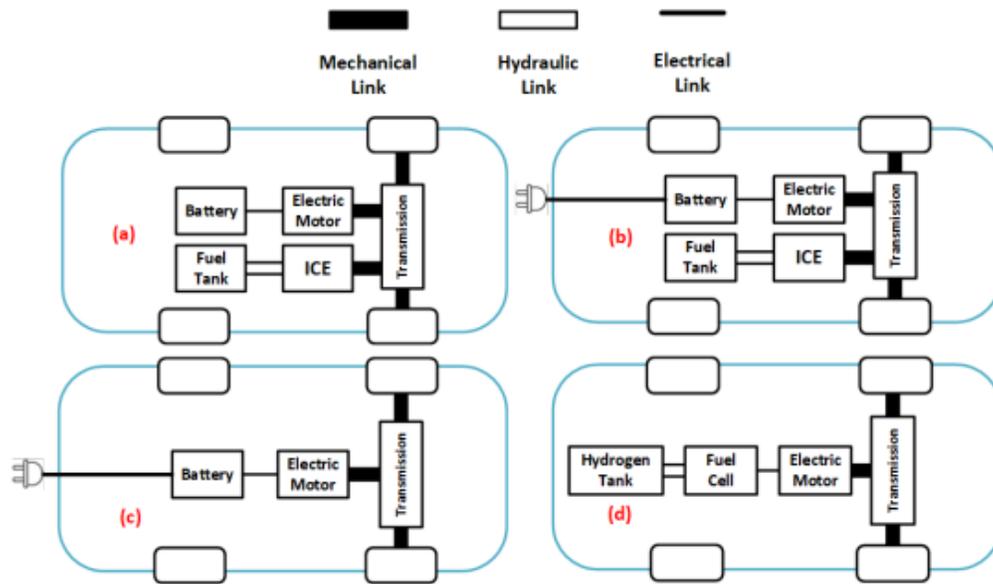


Figura 2.1.2: Estructura básica de algunos tipos de vehículos eléctricos. (a) HEV, (b) PHEV, (c) BEV y (d) FCEV. [5]

2.1.1. Baterías

Dependiendo del tipo de electrolito o conductor eléctrico [4], las baterías de vehículos eléctricos se agrupan en cuatro grupos:

- Baterías en base a plomo: Corresponde a una de las tecnologías de batería más utilizadas en el mercado. En términos de electromovilidad tiene como ventajas su bajo precio y disponibilidad. Como desventajas, presenta un alto peso, menor ciclo de vida con costos por distancia mayores y el desecho de estas tras terminar su ciclo de vida resulta peligroso debido a la naturaleza de sus componentes.

- Baterías en base a níquel: Las baterías en base a níquel tienen una resistencia mecánica mucho mayor, con una vida útil más larga. Se caracterizan por entregar su capacidad total a tasas de descarga mayores. Debido a su naturaleza endotérmica, el tiempo de carga de la batería es mucho menor.
- Baterías en base a sodio: Son baterías de alta potencia y capacidad, resultando adecuadas para aplicaciones de tracción eléctrica. Presentan una alta densidad de energía y bajos costos de producción. Entre sus desventajas se encuentra las altas temperaturas que necesitan para su funcionamiento, lo que resulta en un aumento de la gestión térmica, utilizando aproximadamente un 14 % de su capacidad en mantener estas temperaturas cuando no está en funcionamiento.
- Baterías en base a litio: Es la batería de mayor uso en electromovilidad. Proporciona la mayor densidad energética de todos los sistemas recargables que funcionan a temperatura ambiente, además de requerir menores instancias de mantenimiento. Este tipo de baterías cuenta con una eficiencia de aproximadamente un 92 % [6]. En la figura 2.1.3 se observa un diagrama donde se explica el proceso de carga y descarga de una batería de ion-litio.

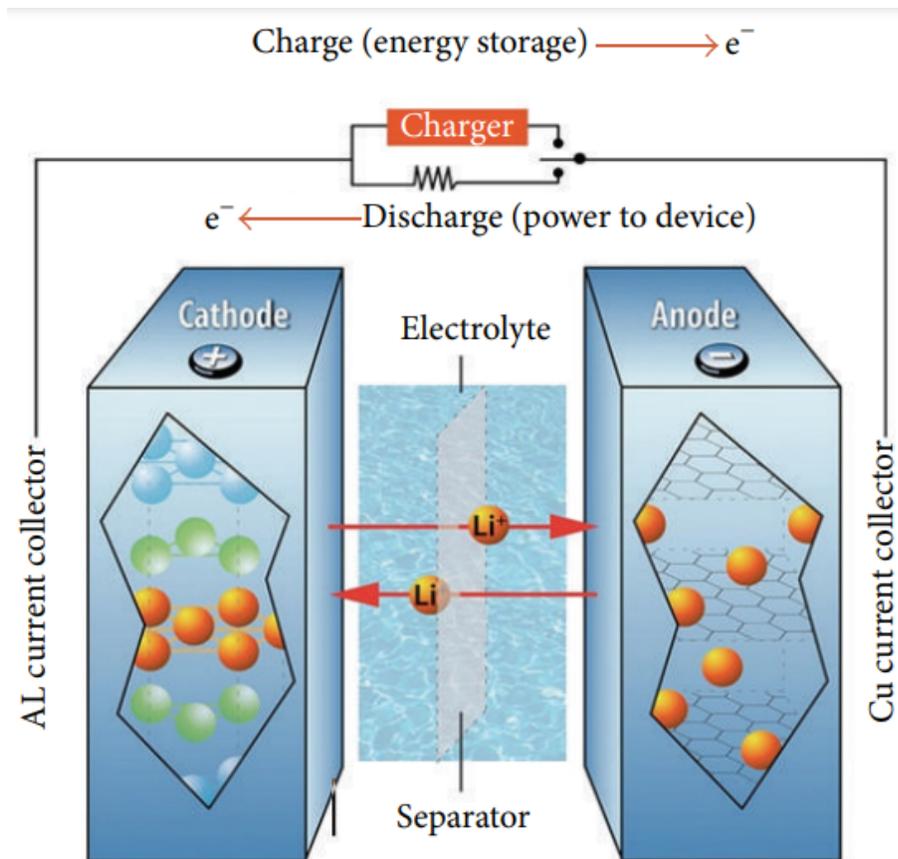


Figura 2.1.3: Diagrama de carga/descarga de la batería de ion-litio. [7].

2.1.2. Sistema de gestión del vehículo

Para garantizar la vida útil del vehículo, mejorar la autonomía, reducir costos y garantizar su seguridad, es necesaria una gestión eficiente de la batería de estos.

El sistema de gestión para la batería de un vehículo (BMS: Battery Management System) se compone de una variedad de sensores, actuadores, controladores y líneas de señal. Este circuito de control tiene como función principal medir señales, entre las que se encuentran temperatura, corriente y voltaje [8].

Estas señales son utilizadas para estimar algunos parámetros, dentro de los cuales destacan: el estado de carga (SOC: State Of Charge) y el estado de salud (SOH: State Of Health).

El estado de carga viene a representar, en vehículos eléctricos, al medidor de combustible de un vehículo de combustión interna. Este se encarga de comunicar el estado de la batería al chofer, evitando así problemas con la sobre carga y sobre descarga de esta. La definición del estado de carga corresponde a la capacidad actual restante de la batería y la disponible bajo ciertas condiciones, donde destacan la temperatura de la batería, relación de carga y descarga, entre otros. Una forma de calcular el estado de carga en el tiempo se presenta en la ecuación 2.1 [7].

$$SOC = \int_{t_0}^t = \frac{I_{batería}(t) \cdot dt}{Q_0} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

Donde Q_0 es la carga total de la batería y $I_{batería}$ es la carga de corriente de la batería.

Otra forma de calcular el estado de carga se observa en al ecuación 2.2 [8].

$$SOC = \frac{Q_c}{Q} \cdot 100 \% = 100 \% - \frac{Q_e}{Q} \quad (2.2)$$

Donde, Q_c es la potencia residual de la batería en el momento de la medición, Q es la potencia total de la batería o carga total y Q_e es la carga de la batería.

2.2. Vehículo parte del estudio

El vehículo que forma parte del estudio corresponde a la marca Hyundai, modelo Ioniq 2019 EV, cuyo diseño y dimensiones principales se pueden observar en las figuras 2.2.1 y 2.2.2.



Figura 2.2.1: Vista delantera y lateral del Hyundai Ioniq 2019. [10]



Figura 2.2.2: Vista trasera del Hyundai Ioniq 2019 [10]

Un resumen de la ficha técnica, donde se observan las características más relevantes del vehículo, se encuentra en la tabla 2.2.1.

Tabla 2.2.1: Ficha técnica Hyundai Ioniq 2019 BEV. [9]

Ficha técnica Hyundai Ioniq 2019 BEV	
Motor eléctrico	Sincrónico de imán permanente (PMSM)
Potencia máxima del motor [kW]	88
Torque máximo [Nm]	295
Tipo de batería	Polímero ion litio - 319 [V]
Capacidad de la batería [kWh]	28
Autonomía promedio [km]	373
Transmisión / N° de velocidades	Caja reductora de velocidad única
Neumáticos	205/60 R16
Largo/ancho/alto [mm]	4470/ 1820 / 1475
Distancia entre ejes [mm]	2700
Peso bruto vehicular [kg]	1970

Este modelo de vehículo, forma parte de una flota de vehículos en estudio, pertenecientes a la empresa Transvip, los cuales fueron introducidos en la capital como una medida para ayudar a disminuir la contaminación acústica y del aire [11].



Figura 2.2.3: Vehículo perteneciente a la flota de la empresa Transvip [11]

Los principales elementos que diferencian a un VE de un ICE son el motor y la fuente de energía, que en este caso corresponde a la batería. En este modelo, la batería utilizada es de ion-litio, cuyas características fueron descritas en la sección anterior. A continuación, se da una descripción del tipo de motor utilizado por el Hyundai Ioniq 2019 BEV.

2.2.1. Motor sincrónico de imanes permanentes

Los motores PMSM son motores cuyo estator se alimenta de corriente alterna (CA). Este estator bobinado corresponde a un electroimán que, al ser conectado a la fuente de alimentación, genera polos de campo magnético en las bobinas. Esto provoca movimiento rotatorio del estator y en consecuencia del rotor. La forma de conseguir campo magnético en el rotor de estos motores es mediante imanes permanentes, con sus respectivos polos norte y sur. Este tipo de motor presenta, aproximadamente, una eficiencia del 95 % [12].

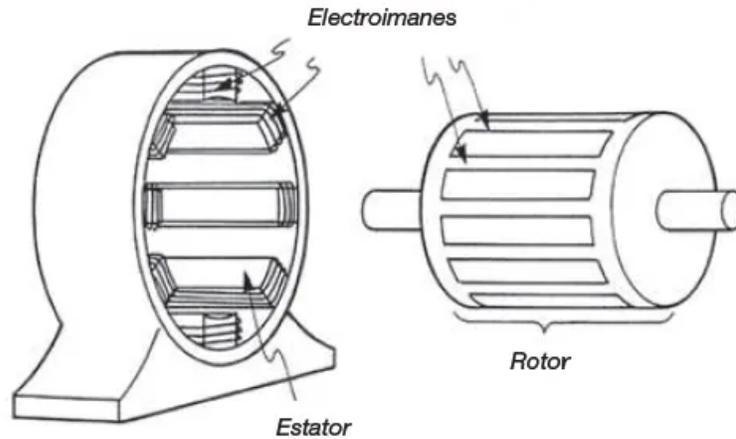


Figura 2.2.4: Esquema del estator y rotor de electroimanes [13].

2.3. Impacto de la climatización en vehículos eléctricos

El ingreso de los vehículos eléctricos en el mercado, en reemplazo a los vehículos de combustión interna supone un desafío, ya que es necesario generar estrategias que respalden los beneficios no solo a nivel medioambiental sino también a nivel económico. Según el Estudio de Movilidad Eléctrica en Chile (2018), los menores costos de mantención y de operación del vehículo eléctrico solo justifican los elevados costos de inversión en el caso donde existe una triplicación del millaje recorrido por el vehículo. El resumen de este análisis se muestra en la figura 2.3.1, donde se observa el costo total de adquisición (TCO: Total Cost of Ownership), el cual tiene como propósito comparar la conveniencia económica del vehículo, considerando tanto el valor de la inversión como los costos operacionales y de mantenimiento. Se muestra este valor para distintos escenarios, uno para cada país diferente y comparando parámetros de vehículos de combustión interna con vehículos del tipo eléctrico.

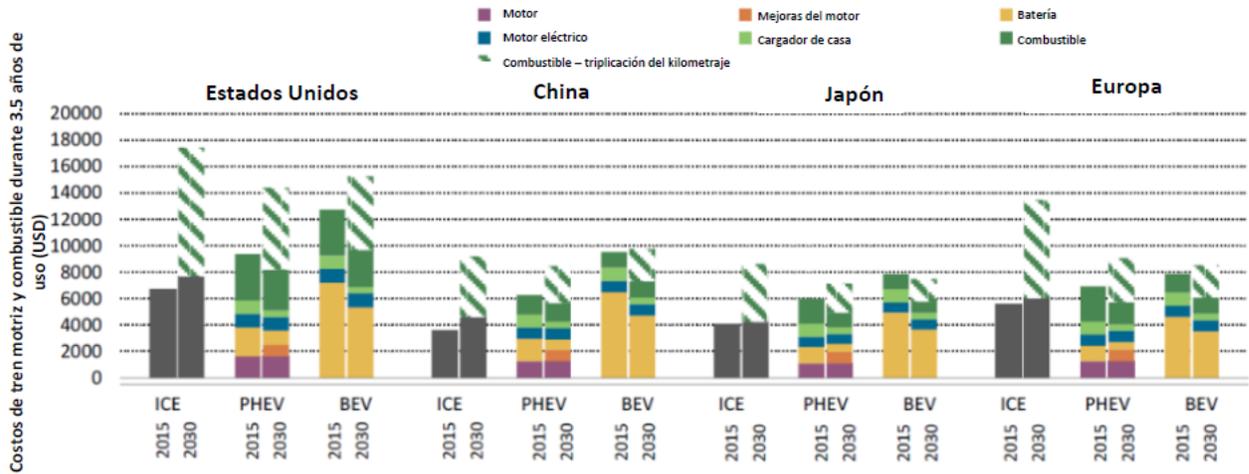


Figura 2.3.1: TCO para el año 2015 y proyectado al año 2030, para vehículos eléctricos a batería, híbridos y de combustión interna, en distintos países alrededor del mundo [14].

La importancia que tienen los costos operacionales como promotor de la inserción de estos vehículos en el mercado es alta, por lo que resulta necesario generar estudios que cuantifiquen el cómo se generan y varían estos costos. Los costos operacionales corresponden a aquellos costos asociados al uso cotidiano de utilizar el vehículo, entre los cuales destaca el consumo de batería o energía. Este consumo se da por dos causas, en primer lugar, por la dinámica propia del vehículo en movimiento y, en segundo lugar, por los consumos auxiliares. El presente trabajo de título se enfoca en esta última causa, donde resalta el consumo de energía por parte del sistema de climatización del vehículo.

El sistema de climatización tiene un gran impacto en la eficiencia energética total, específicamente en la autonomía del vehículo, esto debido a que es el componente auxiliar con mayor consumo de energía. Según una investigación realizada por Zhang (2020), que tenía como objetivo generar un modelo de consumo de energía por parte del sistema de climatización, los principales factores que influyen en este consumo son el clima, la intensidad del uso del vehículo, velocidad media de conducción y el rendimiento del sistema HVAC. En la figura 2.3.2, se resumen los resultados de este estudio, donde se observan los consumos de energía para dos tipos de sistemas de climatización: El sistema de refrigeración individual con calentador PTC (Positive Temperature Coefficient o Coeficiente de temperatura positivo) y el sistema de aire acondicionado con bomba de calor. Esto fue realizado en distintas ciudades a lo largo de China con el fin de variar las temperaturas externas a las que se encontraba expuesto el vehículo.

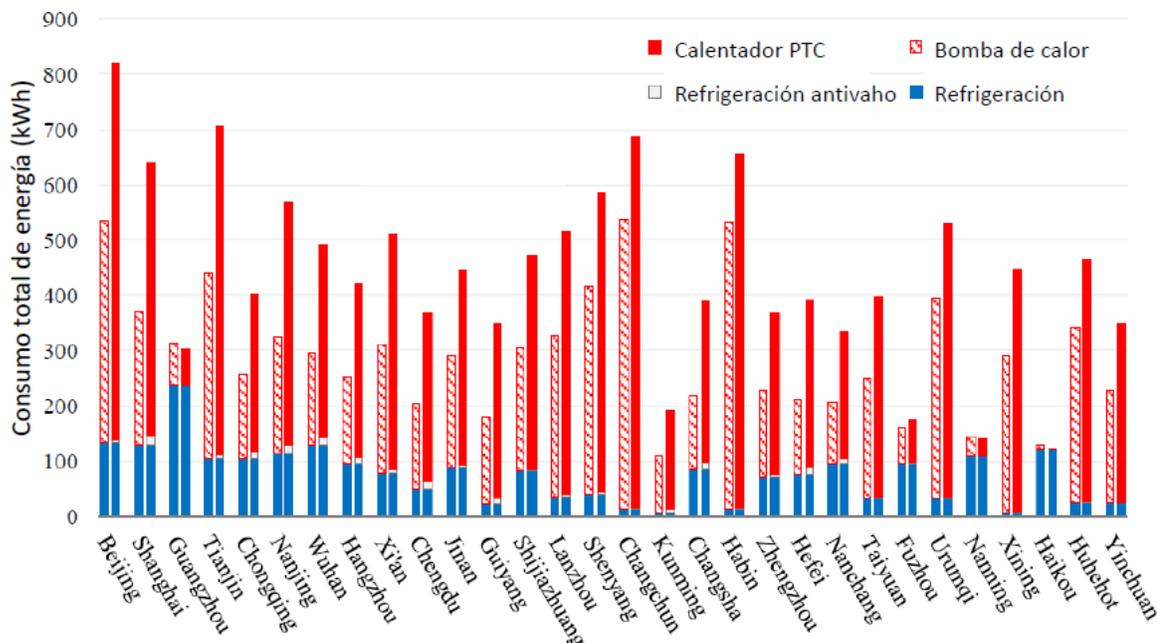


Figura 2.3.2: Consumo anual de energía del sistema de climatización en diferentes ciudades de China [15].

2.4. Sistema de climatización de un vehículo eléctrico

En esta sección se describe el sistema de climatización de un vehículo eléctrico, enfocándose en el ciclo de aire acondicionado, para después describir el sistema de climatización y los ciclos que permiten la refrigeración y calefacción de la cabina, para vehículos en general.

La estructura del sistema de aire acondicionado para un vehículo eléctrico mantiene la misma lógica y estructura para la mayoría de los vehículos. Cualquier sistema de climatización, a modo general, está conformado por cuatro grandes componentes: compresor, condensador, válvula de expansión térmica y evaporador [16].

1. **Compresor eléctrico:** Es el componente central del ciclo de aire acondicionado. Comprime el refrigerante R134a en estado gaseoso aumentando su temperatura. En el caso del vehículo en estudio, el compresor que se utiliza es el Hyundai 97701-G7000 (figura 3.4.2), el cual es un compresor de pistones y cuenta con una eficiencia electromecánica de aproximadamente un 95 % [17].
2. **Condensador:** Corresponde a un intercambiador de calor de tubos y aletas, que hace que el refrigerante R134a en estado gaseoso y caliente, intercambie calor con el aire frío que fluye a través de los tubos planos y las aletas.
3. **Válvula de expansión:** Este componente tiene la capacidad de generar la caída de presión necesaria entre el condensador y el evaporador. Este dispositivo tiene la misión de controlar el caudal de refrigerante en estado líquido que ingresa al evaporador y de

sostener un sobrecalentamiento constante a la salida de este, con el fin de que siempre se encuentre en estado gaseoso. Esto lo logra a través de un bulbo sensor de temperatura que se encarga de cerrar o abrir la válvula para regular el ingreso del R134a.

4. Evaporador: Este componente cumple el mismo proceso de transferencia de calor que el condensador. A diferencia que, en vez de intercambiar calor con el fin de liberarlo, intercambia con la finalidad de absorberlo y así enfriar la cabina.

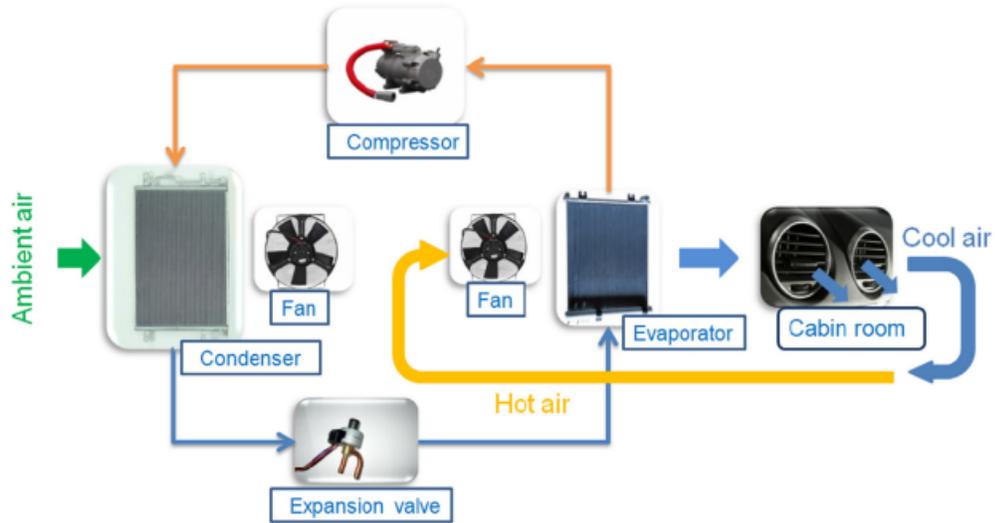


Figura 2.4.1: Esquema del ciclo de aire acondicionado para un vehículo eléctrico [16].



Figura 2.4.2: Compresor eléctrico Hyundai 97701-G7000 [18].

En todo sistema de climatización existen dos ciclos que permiten llegar al confort térmico en la cabina dependiendo de la necesidad que exista. Estos son el ciclo de compresión de vapor que enfría y el ciclo de refrigerante que calienta la cabina [19].

2.4.1. Ciclo de compresión de vapor

El ciclo de compresión abarca una serie de pasos. Parte con el paso del refrigerante a través del evaporador en estado líquido. En este punto ocurre intercambio de calor con el aire de la cabina provocando que el refrigerante cambie a estado gaseoso, debido a la absorción de calor. Cuando el refrigerante sale del evaporador sigue su camino hasta el compresor. En vehículos de combustión interna, este compresor es accionado mediante el movimiento remanente de la correa del cigüeñal del motor. En vehículos eléctricos, como se mencionó en capítulos anteriores, el compresor es eléctrico y es alimentado directamente desde la batería. El compresor mediante el incremento de la presión y, en consecuencia, aumento de temperatura del gas, mueve al refrigerante en dirección al condensador, donde mediante intercambio de calor con el exterior permite el cambio de estado de refrigerante de gaseoso a líquido. En este estado el refrigerante llega a la válvula de expansión térmica, donde mediante el bulbo conectado a la salida del evaporador, regula la cantidad de fluido refrigerante que llega al evaporador, con el fin de que a la salida de este solo haya gas. En la figura 2.4.3 se puede observar un esquema del ciclo de compresión de vapor:

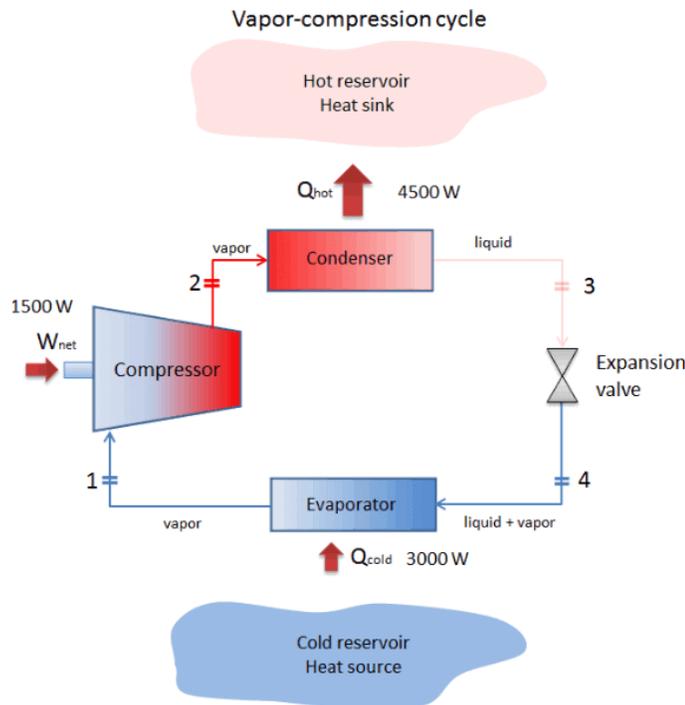


Figura 2.4.3: Esquema del ciclo de compresión de vapor del sistema de climatización [20].

2.4.2. Ciclo de refrigerante

En vehículos de combustión interna, la eficiencia del motor ronda el 30% por lo que el 70% restante se convierte en calor residual. Para eliminar este calor residual se aprovecha el ciclo de refrigerante mediante el uso de un termostato que mantiene al refrigerante a cierta temperatura. Cuando esta excede el nivel de diseño, el refrigerante se dirige a un radiador que tiene contacto con el aire ambiente ubicado en la parte frontal del vehículo, al igual que el condensador. Pero cuando resulta necesario calentar la cabina el refrigerante caliente se dirige a un núcleo de calor que se encuentra hacia el sector del evaporador y permite el intercambio de calor con el aire de la cabina. Esto es distinto en los VE, ya que al existir una alta eficiencia es muy poco el calor residual que se genera y no llega a ser suficiente como para calentar la cabina climas fríos. En este caso, se hace uso de dispositivos extras como bombas de calor, calentadores dedicados, resistencias eléctricas, entre otros. En la figura 2.4.4 se presenta el sistema de aire acondicionado para un vehículo estándar, donde se observan los componentes anteriormente descritos.

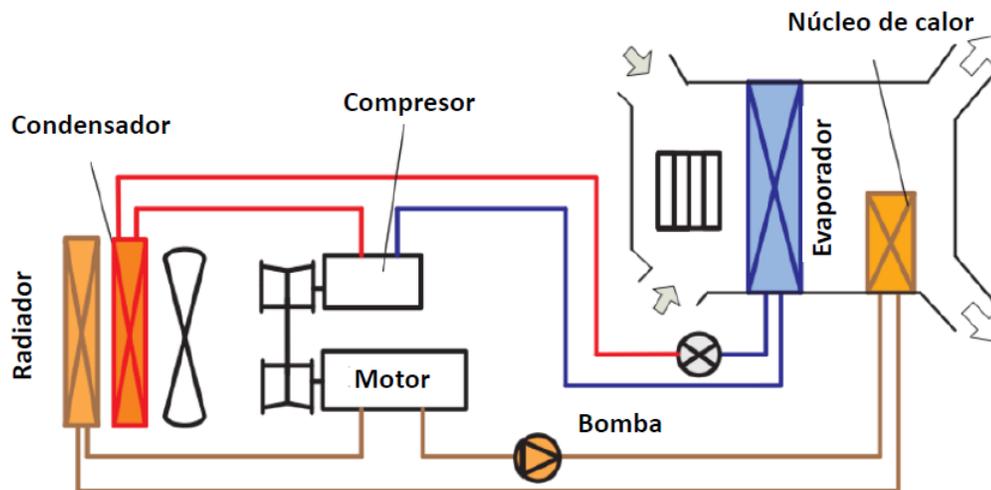


Figura 2.4.4: Esquema del sistema de HVAC para un vehículo estándar [19].

2.5. Modelo lineal para estimación de potencia de aire acondicionado

Brahim Mebarki (2013), publica un estudio que permite evaluar el impacto del sistema de aire acondicionado en el consumo de la potencia de un vehículo eléctrico alimentado por una batería de ion-litio.

Esta investigación propone un modelo donde se determina que la potencia total de un vehículo eléctrico se puede descomponer en dos subsistemas: la cadena de tracción con una potencia P_{TC} y el sistema de aire acondicionado con una potencia P_{AC} .

Para un ciclo de conducción, la potencia requerida por el vehículo, en cada instante de tiempo, puede obtenerse mediante la ecuación 2.3.

$$P_{CH} = P_{TC} + P_{AC} \quad (2.3)$$

Donde, P_{TC} es la potencia de tracción del vehículo y P_{AC} es la potencia de climatización.

Para el modelo desarrollado en este estudio, se determina que la batería debe alimentar los dos subsistemas con la siguiente distribución de la potencia total disponible:

- Sistema de tracción del vehículo, cuya potencia se encuentra entre 20-47 kW.
- Confort térmico, que tiene destinada una potencia entre 1 y 5 kW.

La investigación, además, propone un modelo para el cálculo de la potencia de aire acondicionado P_{AC} . Para ello, realizan una simulación de un sistema de aire acondicionado en Matlab Simulink, donde expone el ciclo a distintas condiciones climáticas representadas mediante distintas temperaturas ambientes. Las fases de estudio y el resultado de la simulación se observan en la tabla 2.5.1 y figura 2.5.1, respectivamente.

Tabla 2.5.1: Distintas condiciones climáticas [7].

Fases	Tiempo [s]	Temperatura [C]
Fase 1	0-2	24
Fase 2	2-4	28
Fase 3	4-6	32
Fase 4	6-8	36
Fase 5	8-10	40
Fase 6	10-12	24

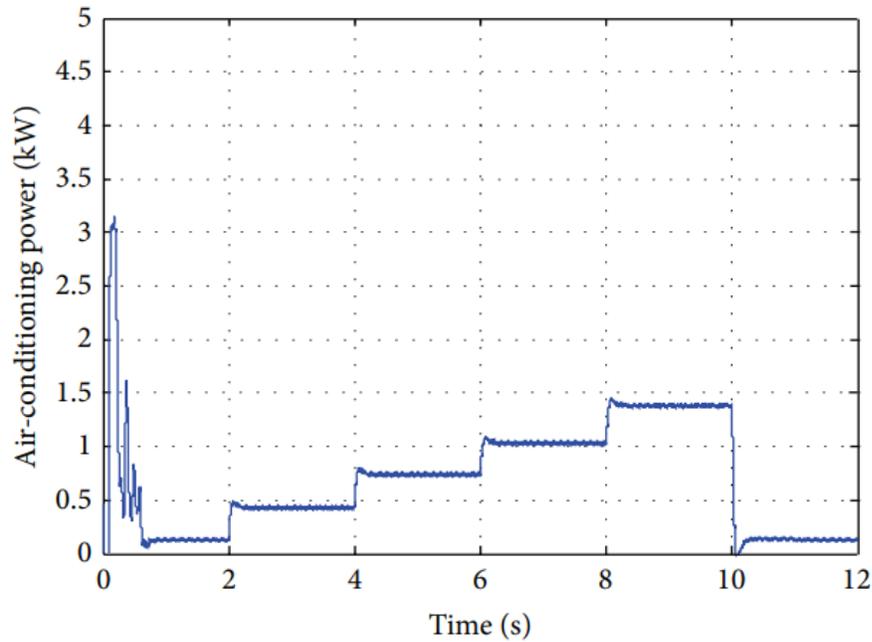


Figura 2.5.1: Evolución de la potencia de aire acondicionado frente a distintas condiciones climáticas [7].

Esta simulación arroja como resultado que la potencia de aire acondicionado a través del tiempo, frente a distintas temperaturas ambiente, presenta un comportamiento lineal. De este modo, P_{AC} se puede calcular de la siguiente manera con la ecuación 2.4.

$$P_{AC} = a \cdot T_a + b \quad (2.4)$$

Donde T_a es la temperatura ambiente y a y b son constantes que pueden ser calculadas tomando condiciones de bordes para cada caso. Estas se describen a continuación:

- La temperatura de la cabina se mantiene constante en una temperatura de confort establecida en $24\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- El sistema de aire acondicionado se encuentra apagado cuando la temperatura ambiente es menor o igual a la temperatura de confort, por lo cual $P_{AC} = 0\text{ kW}$.
- Cuando la temperatura externa es mayor a la temperatura de confort, se utiliza el caso extremo, que corresponde a cuando la temperatura ambiente toma el mayor valor histórico para la ciudad donde se está aplicando el modelo. En el caso de la ciudad de Santiago, este valor corresponde a $37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [21]. En ese punto se utiliza la potencia máxima disponible mencionada más arriba, donde $P_{AC} = P_{max} = 5\text{ kW}$.

Considerando lo mencionado anteriormente, el modelo lineal para la ciudad de Santiago queda definido de la siguiente forma:

$$P_{AC} = 0.35 \cdot T_a - 8.4 \quad (2.5)$$

2.6. Modelos de cargas térmicas para estimación de potencia de aire acondicionado

Los modelos de estimación de carga térmica de climatización necesaria para el mantenimiento de la temperatura de confort son de gran importancia, ya que a diferencia del modelo lineal, estos consideran todos los factores externos e internos a la cabina que pueden afectar a la carga interna total, yendo más allá de la influencia de la temperatura ambiente.

Estos modelos se basan en HBM (Heat Balance Method) o método de balance de calor, el cual toma como elemento principal el concepto de volumen de control. Este, consiste en una región fija en el espacio elegida para el estudio termodinámico de los equilibrios de masa y energía para sistemas de flujo. Este volumen de control presenta una superficie de control, que corresponde al límite de este. La física detrás de esto es que cualquier tasa de cambio de energía en el volumen de control es causada por las tasas de flujo de energía, dentro o fuera del volumen. En estado estable, se puede considerar como un volumen arbitrario donde la masa del fluido permanece constante. Cuando este se mueve a través del volumen de control, la masa que ingresa al volumen es igual a la masa que sale de este. Además, es importante destacar que las variables físicas, tienen un valor uniforme o promedio dentro de este [22].

El HBM, es aplicado por algunos autores dentro de lo que es la cabina de un vehículo, permitiendo estudiar las cargas térmicas por separado y relacionarlas luego mediante un equilibrio energético.

El primero, propuesto por *Mohammad Ali Fayazbakhsh y Majid Bahrami (2013)*, propone un modelo basado en Heat Balance Method (HBM), el cual resulta preciso y fácil de implementar. Este modelo realiza el cálculo de las cargas térmicas asumiendo un estado cuasi-estacionario, planteando que la suma de todos los tipos de carga será la ganancia instantánea de carga de calor total de la cabina. La formulación matemática del modelo se resume en la ecuación 2.6.

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{Met} + \dot{Q}_{Dir} + \dot{Q}_{Dif} + \dot{Q}_{Ref} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{Exh} + \dot{Q}_{Eng} + \dot{Q}_{Ven} + \dot{Q}_{AC} \quad (2.6)$$

A continuación, se procede a definir brevemente cada una de estas cargas:

- \dot{Q}_{Met} = Corresponde a la carga metabólica y se define como el calor ganado por la cabina mediante la actividad metabólica del cuerpo humano.
- \dot{Q}_{Rad} = Corresponde al calor ganado por la radiación solar. Esta se puede dividir en tres tipos de carga \dot{Q}_{Dir} que corresponde a la carga por radiación directa, \dot{Q}_{dif} que corresponde a la carga por radiación difusa y \dot{Q}_{Ref} que corresponde a la carga por radiación reflejada.

- \dot{Q}_{Amb} : Corresponde a la carga térmica entregada por el ambiente a la cabina, que refleja la diferencia entre la temperatura externa e interna de la cabina. Esta carga incluye convección externa, conducción a través de las superficies y la convección interna.
- \dot{Q}_{Exh} : Esta carga corresponde a la carga del tubo de escape y es considerada en vehículos de combustión interna. Esta carga se debe a las altas temperaturas que toma este gas y se transfiere a la cabina a través del piso.
- \dot{Q}_{Eng} : Esta carga corresponde a la carga entregada por el calor expulsado por el motor debido a sus altas temperaturas. Se considera en vehículos de combustión interna y en vehículos híbridos.
- \dot{Q}_{Vent} : Esta carga corresponde al aire fresco proveniente del exterior que sirve para mantener la calidad del aire y eliminar la concentración de CO_2 que se genera por la respiración de los pasajeros.
- \dot{Q}_{AC} : Corresponde a la carga que tiene la función de compensar el resto de las cargas térmicas dentro de la cabina con la finalidad de mantener la temperatura dentro del rango de confort térmico. En climas fríos, la carga de aire acondicionado toma valores positivos, pero en climas cálidos esta toma valores negativos. Esta carga viene definida por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{AC} = -(\dot{Q}_{Met} + \dot{Q}_{Dir} + \dot{Q}_{Dif} + \dot{Q}_{Ref} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{Exh} + \dot{Q}_{Eng} + \dot{Q}_{Ven}) - \frac{(m_a \cdot C_a + DTM) \cdot (T_i - T_{comf})}{t_c} \quad (2.7)$$

Donde m_a y C_a corresponden a la masa y el calor específico del aire, respectivamente. DTM corresponde a la inercia térmica general de todos los objetos dentro de la cabina (asientos, tablero, componentes, etc.) los cuales absorben calor que luego es liberado y se combina con el aire de la cabina. t_c es la constante del pull-down time (t_p) que corresponde al tiempo requerido para que la temperatura de la cabina alcance la temperatura de confort dentro de un 1 [K]. t_c . Se puede definir por la siguiente fórmula:

$$t_c = \frac{t_p}{\ln(T_0 - T_{comf})} \quad (2.8)$$

Donde, T_0 corresponde a la temperatura inicial de la cabina y T_{comf} a la temperatura de confort deseada.

Este modelo también considera la variación de la temperatura interna y la de superficie, en cada intervalo de tiempo del viaje. Estas se definen a continuación.

$$\Delta T_i = \frac{\dot{Q}_{tot}}{m_a \cdot C_a + DTM} \cdot \Delta t \quad (2.9)$$

$$\Delta T_s = \frac{\dot{Q}_s}{m_s \cdot C_s} \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

Donde ΔT_i y ΔT_s corresponde a los cambios de temperatura en la cabina y las superficies, Δt corresponde al paso del tiempo y m_s y C_s corresponden a la masa y el calor específico del material de la superficie.

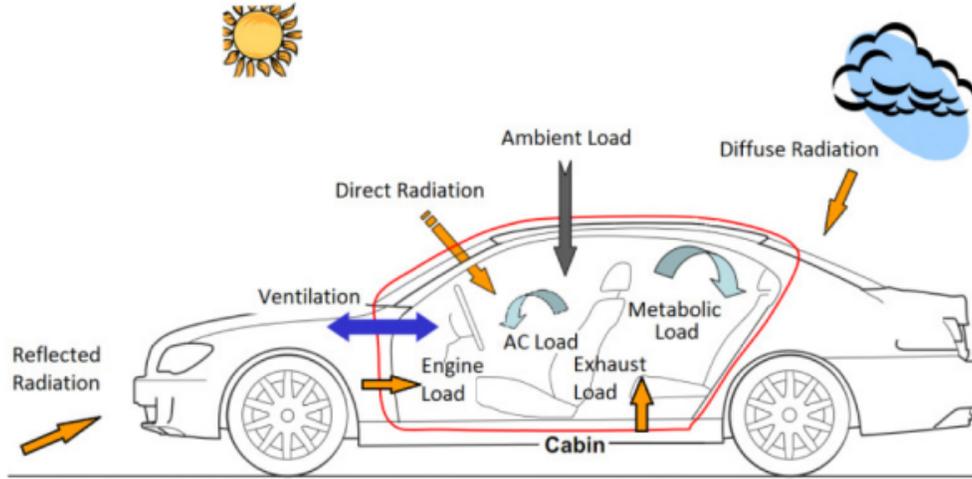


Figura 2.6.1: Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Fayazbakhsh y Bahrami [23].

El segundo modelo de cargas térmicas para la cabina de un vehículo es el propuesto por *David Marcos (2014)*. Este considera que la cabina del vehículo recibe calor proveniente del exterior en ciertas superficies donde se considera que el intercambio de calor es mayor. Estas corresponden al parabrisas, ventana trasera, ventanas laterales, techo y la zona donde se encuentra el panel de la cabina. Esta última considera todos los elementos que se encuentran dentro, ya sean asientos, paneles, manubrio, etc.

El modelo plantea que la variación de la temperatura interna de la cabina se define mediante la siguiente fórmula:

$$m_{air} \cdot C_{air} \cdot \frac{dT_{air}}{dt} = \dot{Q}_{ventanas} + \dot{Q}_{techo} + \dot{Q}_{panel,frontal} + \dot{Q}_{metabólico} \quad (2.11)$$

Utilizando equilibrio térmico en cada una de las superficies consideradas y la definición de cada uno de los tipos de transferencia de calor.

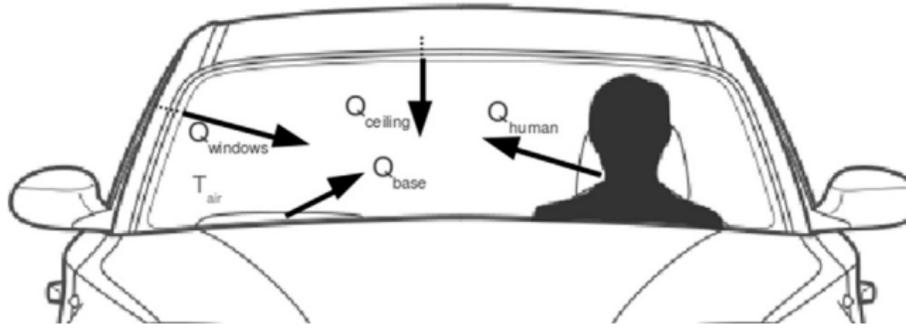


Figura 2.6.2: Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Marcos [24].

Los dos modelos hasta ahora mencionados consideran la simplificación de las superficies de la cabina, utilizando planos, basándose en el formato de polígono (PLY). Los polígonos utilizados por ambos autores se pueden observar en las figuras 2.6.3 y 2.6.4.

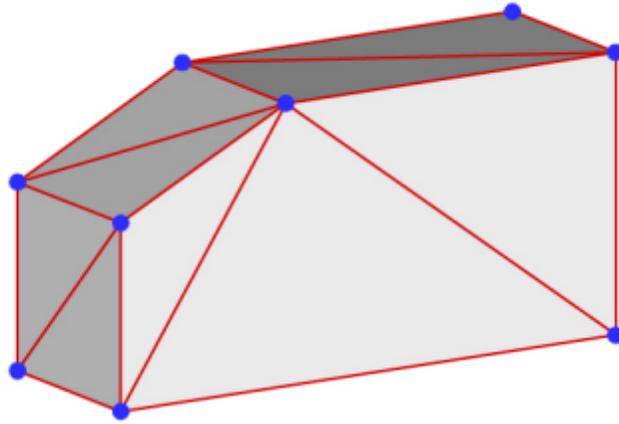


Figura 2.6.3: Polígono de la cabina propuesto por Fayazbakhsh y Bahrami [23].

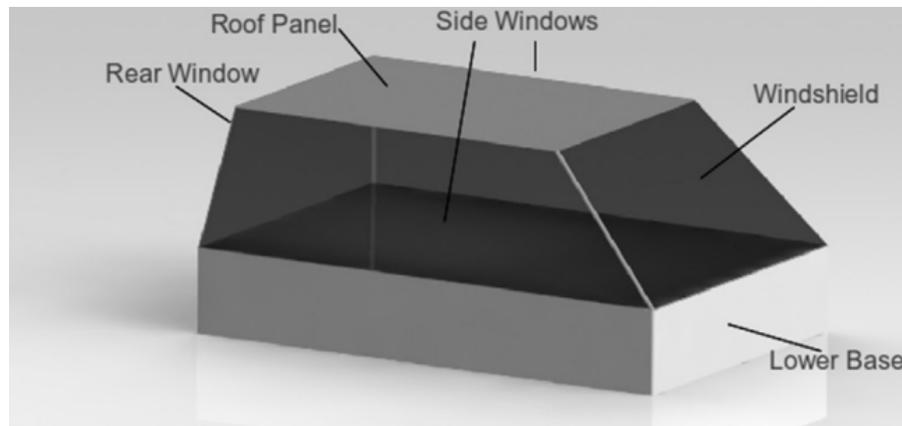


Figura 2.6.4: Polígono de la cabina propuesto por Marcos [24].

El tercer modelo es el propuesto por *Cvok (2021)* donde plantea que la carga de aire acondicionado se rige por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{HVAC} = k_c \cdot c_{p,ac} \cdot \rho_c \cdot V_c \cdot \frac{dT_c}{dt} - (\dot{Q}_{met} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{ab}) \quad (2.12)$$

Donde, k_c es un factor de escalamiento de la inercia térmica del aire de la cabina, $c_{p,ac}$ corresponde al calor específico del aire de la cabina, ρ_c a la densidad del aire de la cabina, V_c al volumen del aire de la cabina, y $\frac{dT_c}{dt}$ corresponde a la variación de la temperatura de la cabina y \dot{Q}_{met} , \dot{Q}_{ab} y \dot{Q}_{rad} a la carga térmica metabólica, ambiental y por radiación, respectivamente.

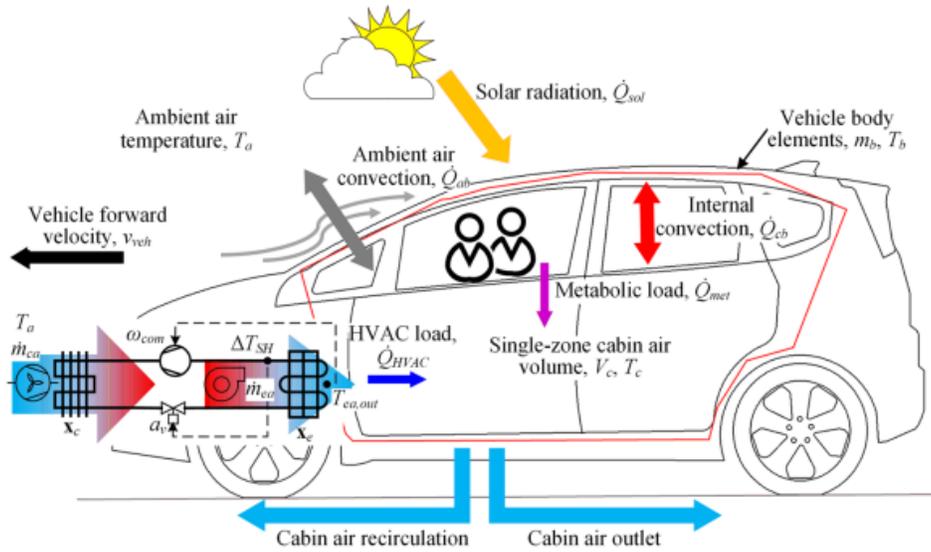


Figura 2.6.5: Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Marcos [25].

Finalmente, el cuarto modelo de cargas térmicas que sirve de referencia para la creación del modelo de este trabajo, corresponde al propuesto por *Xie (2020)*. Este plantea que la carga térmica total de la cabina se define por:

$$\dot{Q}_{cab} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{solar} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{met} + \dot{Q}_d \quad (2.13)$$

Donde \dot{Q}_{cab} corresponde a la carga térmica de la cabina, \dot{Q}_{conv} las cargas térmicas por convección, \dot{Q}_{solar} solar, \dot{Q}_{vent} ventilación del vehículo, \dot{Q}_{met} metabólica, y \dot{Q}_d es el calor generado por los equipos mecánicos y electrónicos dentro de la cabina.

Siguiendo lo planteado por la ley de conservación de la energía, la variación de la temperatura del aire de la cabina está definida por:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{\dot{Q}_{cab} - \dot{Q}_{AC}}{m_a \cdot c_a} \quad (2.14)$$

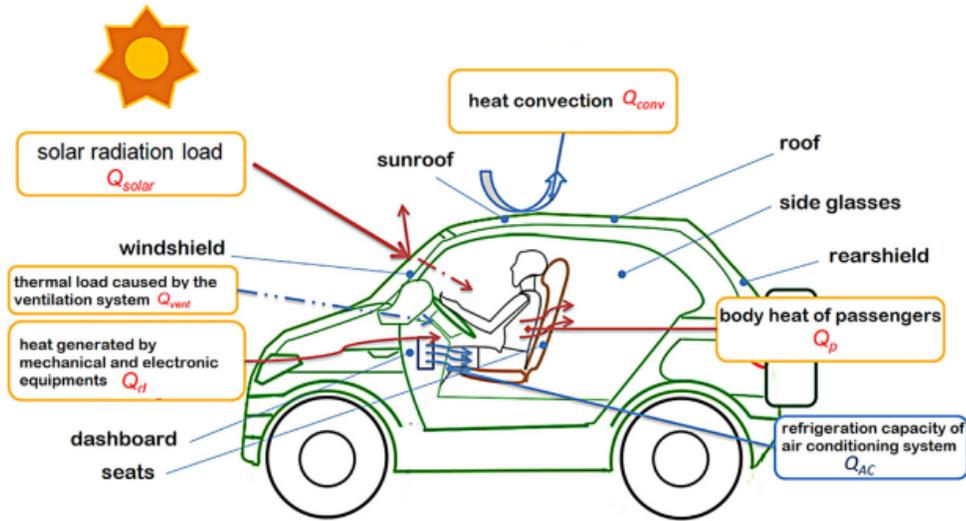


Figura 2.6.6: Esquema del modelo de la cabina y sus cargas térmicas propuesto por Xie [16].

2.7. Transferencia de calor

La energía total de un sistema se define como la suma de todas las formas de energía, entre las cuales se encuentran la energía interna, cinética y potencial. Enfocándonos en la primera, esta representa la energía molecular de un sistema, presentando diferentes formas. Entre todas las formas destacan la sensible y latente, ya que estas formas de la energía interna se pueden transferir de un medio a otro. Dicho esto, la transferencia de calor, como proceso, consiste en el intercambio de las formas sensible y latente de la energía interna entre dos medios dado por una diferencia de temperatura. La razón de transferencia de calor por unidad de área se conoce como flujo de calor, la cual se denota por \dot{Q} [26].

La transferencia de calor se puede expresar mediante tres formas: conducción, radiación y convección.

2.7.1. Conducción

La transferencia de calor por conducción tiene su base en la transferencia energética de las partículas con mayor energía hacia las partículas vecinas que tienen una menor concentración de esta [26].

Este tipo de transferencia de calor se rige por la ley de Fourier, la cual se expresa mediante la fórmula 2.15.

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.15)$$

Donde A es el área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, k es la conductividad térmica del material y $\frac{dT}{dx}$ corresponde al gradiente de temperatura en la dirección de la transferencia.

2.7.2. Convección

La transferencia de calor por convección se da entre superficies sólidas y fluidos adyacentes en movimiento. La razón de la transferencia de calor por convección se expresa mediante la Ley de enfriamiento de Newton la cual dice, en términos simples, que en un medio donde existe un objeto y un fluido a cierta temperatura la dirección del calor irá desde donde hay una mayor temperatura hacia una menor [27]. Esta se define mediante la siguiente ecuación 2.16.

$$\dot{Q}_{conv} = A \cdot h \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

Donde A es el área a través de la cual se realiza la transferencia de calor, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección y $\Delta T = T_s - T_\infty$, con T_s la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente lejos de esa superficie.

2.7.2.1. Convección natural

En la convección natural, cualquier movimiento del fluido ocurre por medios naturales, como la flotación. El régimen del flujo en la convección natural lo rige un número adimensional conocido como número de Grashof, el cual representa la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido [27]. La ecuación por la cual se define el número de Grashof se observa a continuación:

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (2.17)$$

Donde:

- g = Aceleración gravitacional, en $\frac{m}{s^2}$.
- β = Coeficiente de expansión volumétrica, el cual representa la variación de la densidad del fluido con la temperatura a presión constante y para un gas ideal se expresa como $\beta = \frac{1}{T}$, en donde T es la temperatura absoluta en K.
- T_s = Temperatura de la superficie, en K.
- T_∞ = Temperatura del fluido lejos de la superficie, en K.
- L_c = Longitud característica de la configuración geométrica, en metros.
- ν = Viscosidad cinemática del fluido, en $\frac{m^2}{s}$.

Las correlaciones para el número de Nusselt en la convección natural se expresan en términos del número de Rayleigh, definido como:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad (2.18)$$

Donde Ra_L corresponde al número de Rayleigh y Pr corresponde al número de Prandtl, el cual describe la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica.

Existen distintas relaciones para determinar el número de Nusselt promedio de acuerdo con el tipo de superficie y así determinar el coeficiente de convección. El coeficiente convectivo cuantifica la influencia de los distintos elementos involucrados en este tipo de transferencia de calor (fluido, superficie y flujo). Para poder calcular este coeficiente, resulta necesario obtener el número de Nusselt, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Nu = \frac{h_i \cdot L_c}{k} \quad (2.19)$$

Donde,

- Nu: Número de Nusselt
- h_i : Coeficiente de convección natural, en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
- L_c : Largo característico de la superficie, en metros.
- k : Conductividad térmica del aire, en $\frac{W}{m \cdot K}$

Tanto el Gr_L , Ra_L y Nu, son números adimensionales.

El número de Nusselt para los distintos tipos de superficie se resume a continuación:

1. Placa vertical: Esta correlación empírica para Nu se caracteriza por considerar todo el intervalo de valores que puede tomar el número de Rayleigh:

$$Nu = \left\{ 0.825 \cdot \frac{0.387 \cdot Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (2.20)$$

2. Placa inclinada: Esta correlación es la misma que la utilizada para placas planas, solo que el número de Grashof utilizado dentro de Ra_L queda de la siguiente forma:

$$Gr_L = \frac{g \cdot \cos(\theta) \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (2.21)$$

Donde θ corresponde al ángulo entre la superficie y el eje vertical.

3. Placa horizontal: De las relaciones existentes para los distintos casos de placa horizontal, la que destaca y se utiliza es la que se define para una superficie inferior de una placa caliente. Esta fórmula se puede ocupar en un rango para número de Ra_L entre $10^5 - 10^{11}$:

$$Nu = 0.27 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (2.22)$$

En este caso la longitud característica de este tipo de superficie, término que forma parte de Gr_L y a su vez de Ra_L , se determina de la siguiente manera:

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (2.23)$$

Donde L_c corresponde a la longitud característica en metros, A_s es el área superficial en m^2 y P es el perímetro, en metros.

2.7.3. Radiación

La radiación es la energía emitida por la radiación electromagnética. Considerando a la mayoría de los cuerpos como cuerpos grises (con emisividades menores a 1), la razón de la radiación que se puede emitir desde una superficie se rige por la Ley de Stefan-Boltzmann, cuya ecuación es la siguiente:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.24)$$

Donde ε corresponde a la emisividad de la superficie, A a la superficie donde ocurre la transferencia, σ corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann, T_s^4 corresponde a la temperatura de la superficie y T_a^4 es la temperatura de los alrededores.

2.7.3.1. Radiación solar

El sol es la principal fuente de energía en la tierra. Esta energía llega a nosotros mediante la forma de ondas electromagnéticas. Después de su paso por la atmósfera, la energía emitida por el sol toma la forma de radiación atmosférica. La energía solar que incide sobre la superficie terrestre se conforma por una componente directa, otra difusa y otra reflejada [28]. La parte de la radiación que llega sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se conoce como radiación directa, en cambio, la radiación dispersada que llega a la superficie terrestre desde todas las direcciones corresponde a la radiación solar difusa. Considerando que la componente reflejada no incide si no que se refleja, la energía solar total que incide sobre unidad de área de una superficie horizontal se define mediante la siguiente ecuación:

$$I_{solar} = I_{dir} \cdot \cos(\theta) + I_{dif} \quad (2.25)$$

Donde θ es el ángulo que forma el rayo del sol de radiación directa con la normal a la superficie.

Esta radiación total, como cualquier otra, presenta tres componentes al momento de incidir sobre una superficie. La parte de radiación que es absorbida por la superficie se llama absorptividad α , la parte que es transmitida se conoce como transmisividad τ y la parte reflejada se llama reflectividad ρ .

Según la primera ley de la termodinámica, es necesario que las tres componentes de la radiación sea igual a la radiación incidente, lo cual determina que las partes de la radiación mencionadas anteriormente sigan la siguiente relación:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (2.26)$$

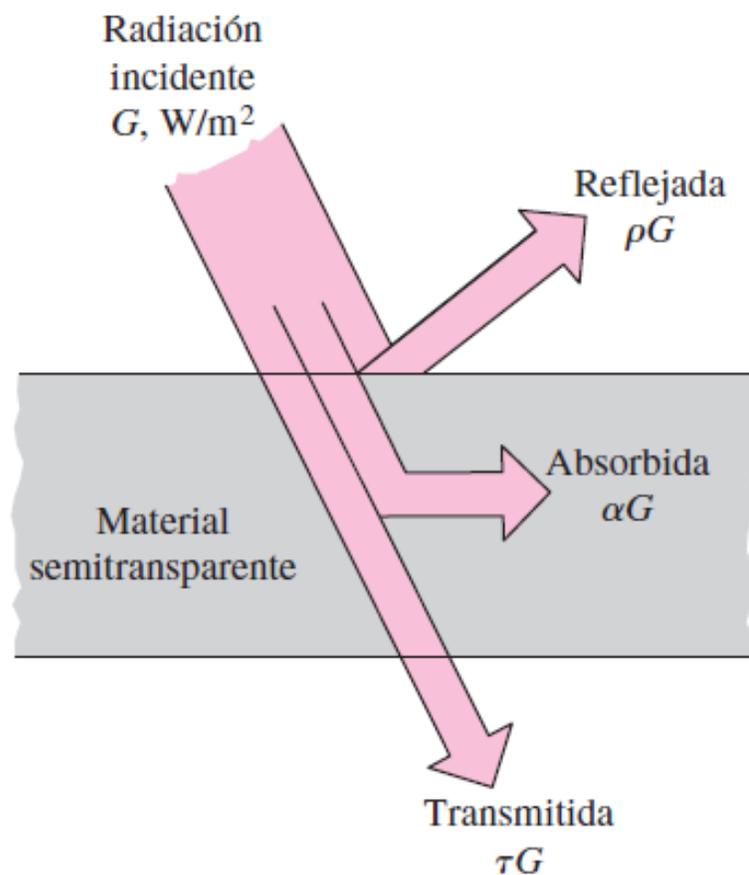


Figura 2.7.1: Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente [28].

2.7.3.2. Ángulo de incidencia del haz de radiación solar sobre una superficie

Para estimar el ángulo de incidencia formado por el haz de radiación y la normal a una superficie dentro de la tierra, resulta necesario conocer algunos conceptos previos.

La determinación de este ángulo depende de distintos factores, dentro de los cuales desta-

can: El día del año, la hora del día y la posición del cuerpo en el plano terrestre en términos de longitud y latitud. Estos factores entregan la información angular necesaria para la determinación del ángulo de incidencia sobre la superficie [29]. A continuación, se describen estos parámetros:

1. Posición angular de la tierra en la órbita

La tierra, en su movimiento alrededor del sol, describe una órbita elíptica y dentro de esta se puede determinar la posición angular de la tierra dentro de la elipse, a lo largo del año. Para esto se utiliza α_s , que corresponde a la posición angular de la tierra en la órbita y se define mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot (nd - 1)}{365} \quad (2.27)$$

Donde α_s es la posición angular (en grados), y nd corresponde al día del año.

Para determinar el día del año se hace uso de la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Fórmulas para estimación del día del año (nd) [30]

Mes	Día del año
Enero	d
Febrero	d+31
Marzo	d+59
Abril	d+90
Mayo	d+120
Junio	d+151
Julio	d+181
Agosto	d+212
Septiembre	d+243
Octubre	d+273
Noviembre	d+304
Diciembre	d+334

Para un año bisiesto, a partir del mes de febrero, se debe añadir un uno al termino $d + X$.

2. Declinación solar

La declinación solar corresponde al ángulo entre la línea del ecuador y una trazada desde el centro de la tierra al centro del sol. Debido al movimiento de la tierra alrededor del sol, el valor de este ángulo varía durante el año.

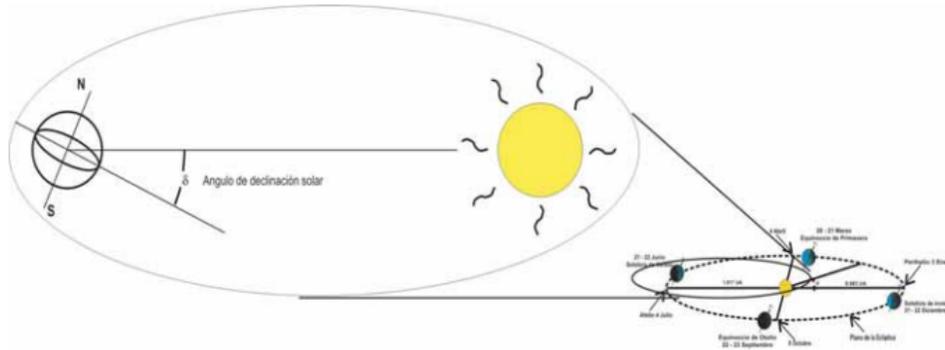


Figura 2.7.2: Esquema explicativo del ángulo de declinación solar [29].

La declinación solar puede ser calculada mediante el modelo de Spencer (ecuación 2.28), con un error máximo de 0.0006 radianes.

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cdot \cos(\alpha_s) + 0.070257 \cdot \text{sen}(\alpha_s) - 0.006758 \cdot \cos(2 \cdot \alpha_s) + 0.000907 \cdot \text{sen}(2 \cdot \alpha_s) - 0.002697 \cdot \cos(3 \cdot \alpha_s) + 0.00148 \cdot \text{sen}(3 \cdot \alpha_s)) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (2.28)$$

Donde δ es la declinación solar en grados.

3. Sistemas de coordenadas

Existen dos sistemas de coordenadas que trabajan en conjunto para poder determinar la posición del sol dentro de la esfera celeste, el sistema de coordenadas celestes horizontales y las coordenadas celestes ecuatoriales. La esfera celeste corresponde a una representación del cielo mediante una esfera imaginaria cuyo centro se fija en la tierra.

- Sistema de coordenadas celestes horizontales : En este sistema de coordenadas, la determinación de la posición del sol viene dada por una serie de ángulos, dentro de los que se encuentra el azimut, la distancia cenital y su complemento la altura solar.

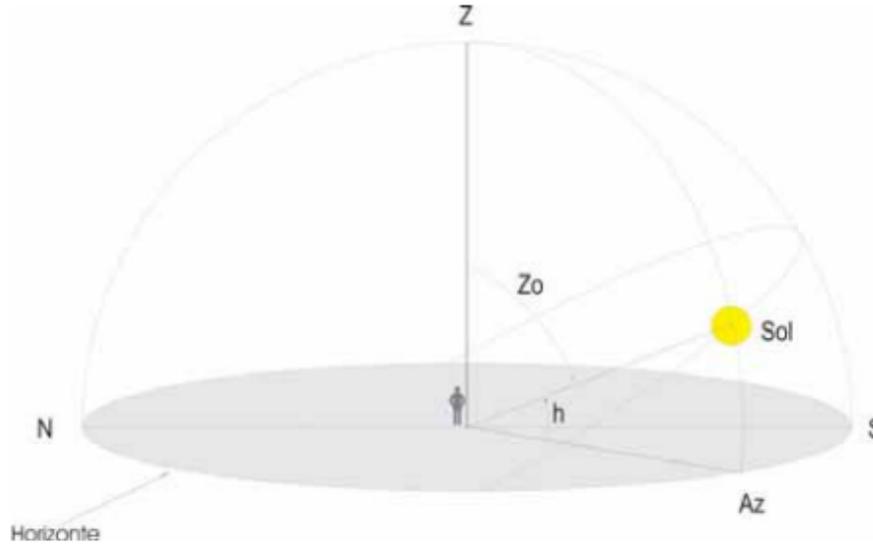


Figura 2.7.3: Sistema de coordenadas celestes horizontales [29].

- a) Distancia cenital (Z_o): corresponde a la distancia angular entre el zenit (Z) del observador y la posición del sol. Esta puede ser calculada con la siguiente fórmula:

$$\cos(Z_o) = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega) \quad (2.29)$$

- b) Altura solar: Es la distancia angular entre el horizonte del observador y el sol. Esta puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (2.30)$$

Este ángulo puede ser calculado también como:

$$h = 90 - Z_o \quad (2.31)$$

- c) Azimut A_z : Corresponde a la distancia angular, medida desde el sur del lugar del observador y la proyección sobre el horizonte del meridiano que pasa por el zenit del observador.
- Sistema de coordenadas celestes ecuatoriales: En este sistema la posición del sol está determinada por la declinación y el ángulo horario (ω), el cual corresponde al ángulo formado en el polo por la intersección entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. Este ángulo indica el desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar, tomando como origen del ángulo las 12 pm, el cual va creciendo en el sentido del movimiento del sol. El ángulo horario se puede expresar en unidades de grados o de tiempo, donde una hora equivale a 15° . Este ángulo se puede calcular mediante la ecuación 2.32.

$$\omega = \frac{360}{24} \cdot (TSV - 12) \quad (2.32)$$

Donde ω corresponde al ángulo horario y TSV al tiempo solar verdadero, el cual será explicado más adelante.

4. Medida del tiempo

El tiempo se mide a partir del intervalo transcurrido entre dos pasos sucesivos del sol frente a un mismo meridiano. Debido a que la órbita de la tierra alrededor del sol es elíptica, los intervalos de tiempo entre dos pasos varían día a día durante el año. Por esta razón existen dos tipos de tiempo que se describen continuación.

- a) Tiempo solar verdadero (TSV): Corresponde al tiempo real que determina el sol a su paso sobre un meridiano. El tiempo solar verdadero se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$TSV = TSM + 4 \cdot (L_s - L_L) + E_t \quad (2.33)$$

Donde:

- L_s : Corresponde a la longitud geográfica del meridiano de referencia del país en grados. Para calcular este valor debe considerarse el GMT (Greenwich Meridiam Time, Hora del meridiano de GreenWich o zona horaria). En Chile, al existir cambio de hora durante el año, toma el valor de -3 durante el verano. Para pasar a grados se multiplica por 15, ya que como se dijo anteriormente 1 hora = 15°.
- L_L : Corresponde a la longitud geográfica del meridiano del lugar, en grados.
- E_t : Corresponde a la ecuación del tiempo, que es la diferencia de tiempo entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio. Existe un modelo matemáticos derivado de una serie de Fourier, desarrollado por Spencer (ecuación 2.34), el cual sirve para calcular la ecuación del tiempo en cualquier día del año:

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos(\alpha_s) - 0.032077 \cdot \sen(\alpha_s) - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot \alpha_s) - 0.040089 \cdot \sen(2 \cdot \alpha_s)) \cdot (229.18) \quad (2.34)$$

- b) Tiempo solar medio (TSM): Corresponde, en términos simples, a la hora que uno observa en el reloj. Se define este tiempo imaginando un sol ficticio que gira a velocidad constante y en forma circular alrededor de la tierra de modo que la duración de los días permanezca constante durante todo el año.

5. Ángulo de incidencia del haz de radiación

Existe una relación geométrica entre un plano con una orientación dada, relativa a la tierra, y el haz de radiación solar (figura 2.7.4).

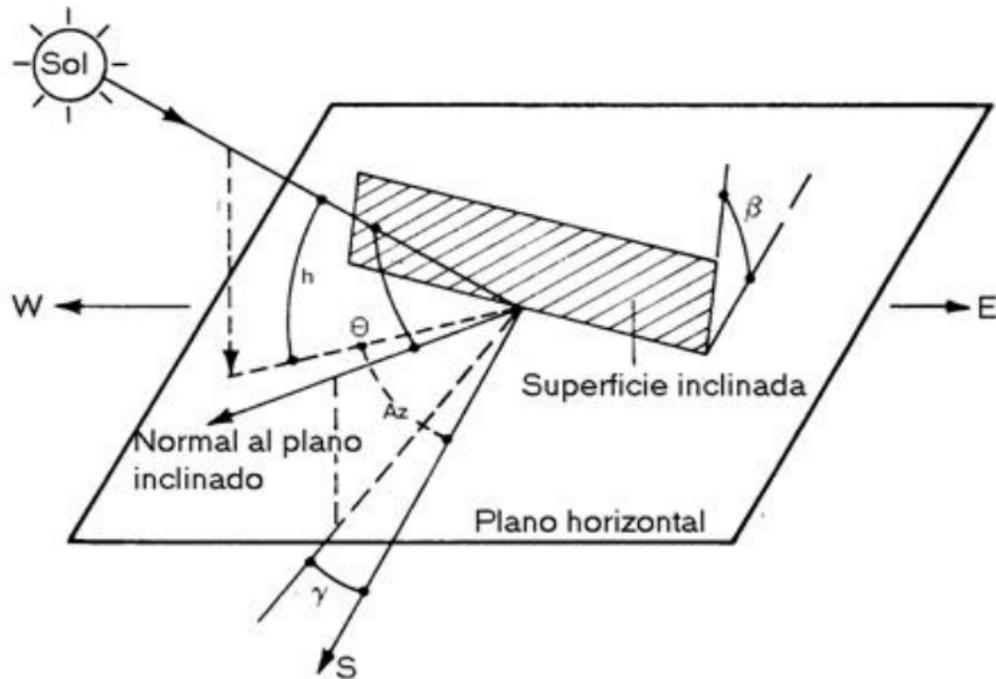


Figura 2.7.4: Esquema del ángulo de incidencia del haz de radiación sobre una superficie arbitraria [29].

Esta relación geométrica viene dada por la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & (\text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \cos(\beta_z)) - (\text{sen}(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\beta_z) \cdot \cos(\gamma)) \\ & + (\cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta_z) \cdot \cos(\omega)) \\ & + (\cos(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\beta_z) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega)) \\ & + (\cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta_z) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(\omega)) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Donde:

- θ : Ángulo de incidencia entre el haz de radiación y la normal a la superficie.
- β_z : Corresponde al ángulo entre el plano dado y la superficie horizontal (β en la figura 2.7.4).
- γ : Corresponde al azimut de superficie.
- ϕ : Corresponde a la latitud del lugar.

6. Azimut de superficie

El ángulo azimut de superficie corresponde a la desviación angular de la proyección de la normal a la superficie inclinada con respecto al meridiano local. En el hemisferio sur, este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, es 0° hacia el norte y hacia el sur 180° [31].

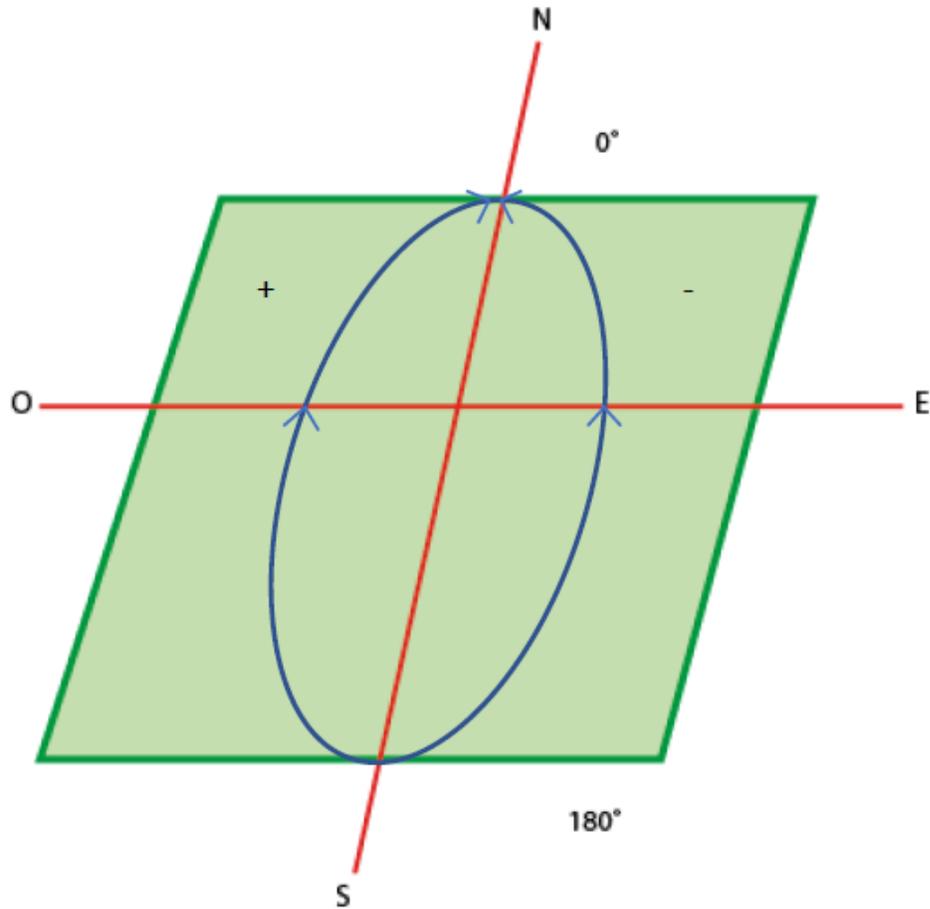


Figura 2.7.5: Dirección de la medición del ángulo azimut de superficie.

Las secciones desarrolladas anteriormente sirven de preámbulo para el desarrollo de este trabajo, especialmente en el modelo de cargas térmicas propuesto, donde se utilizan conceptos y fórmulas explicadas en este capítulo.

Capítulo 3

Metodología

En términos generales, la metodología seguida para la realización de este trabajo se observa en la figura 3.0.1. Esta comprende los pasos iniciales que se observan a la izquierda de la imagen, los cuales son independientes y deben realizarse en conjunto para dar continuidad a los principales procesos del trabajo.

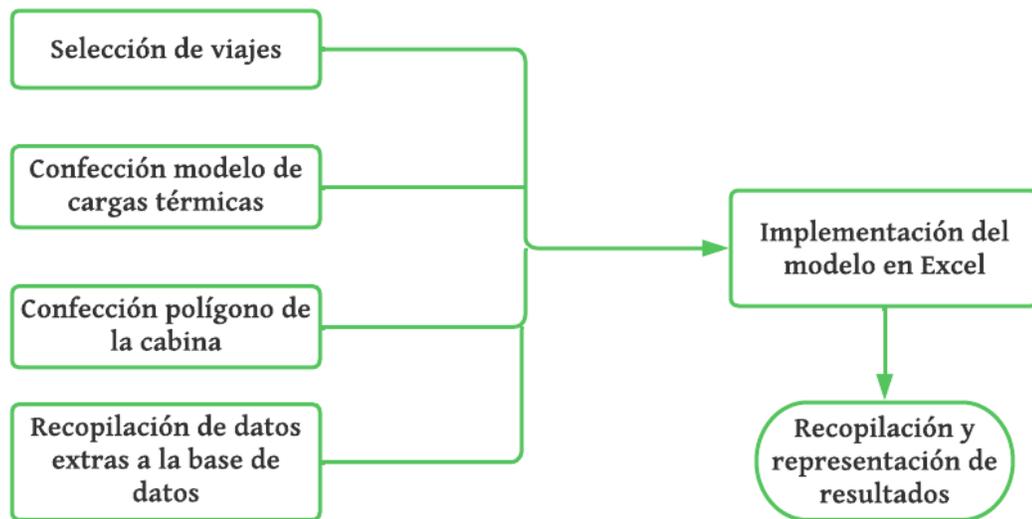


Figura 3.0.1: Esquema general de los pasos a desarrollar durante el trabajo.

A continuación, se describen en detalle los procesos resumidos en la imagen.

3.1. Selección de viajes

Para la selección de viajes, primero se debe realizar una limpieza de la base de datos recogidos por telemetría. Se escoge el vehículo CE25, cuya data es una extensión de archivo del entorno de desarrollo Matlab. Esta data se transforma a archivos con extensión `xlsx`, que corresponde a la extensión de los archivos del programa Excel. Con el archivo exportado,

para seleccionar los viajes, se toman en consideración los puntos planteados por el informe de ruta sustentable [32], donde se considera lo siguiente:

1. Velocidad media mayor a $1 \left[\frac{km}{h}\right]$
2. Distancia recorrida mayor a $500 [m]$
3. Energía consumida en el viaje entre 0 y $28 [kWh]$.
4. Ascensos y descensos menores a $5000 m$.

Los viajes seleccionados se separan en dos categorías:

- Viajes ruta similar: La primera categoría consiste en cinco viajes con una ruta similar, de corta duración, desde un punto de partida igual para todos los viajes. Este punto se ubica en la comuna de Maipú, teniendo como final del trayecto, distintos puntos del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benitez. Estos viajes se realizan en distintas fechas y distinto horario, entre los meses de enero y abril del año 2020.
- Viaje ruta larga: Aquí se seleccionó un único viaje cuya ruta tiene como punto de partida la comuna de San Bernardo y como destino final el Aeropuerto.

En la tabla 3.1.1, se presentan los parámetros extraídos para ser utilizados en la aplicación del modelo, obtención y representación de resultados. Entre estos se encuentra el intervalo de tiempo específico de cada viaje, estado de carga inicial y final, la velocidad promedio y la duración.

Tabla 3.1.1: Parámetros extraídos desde la base de datos.

Viaje	Hora de muestreo	SOC_i	SOC_f	$\bar{V} \left[\frac{km}{h}\right]$	Duración
20 de enero	17:46:14 - 18:04:04	41	37	38	1070
27 de enero	19:06:55 - 19:21:25	12.5	9	53	870
10 de febrero	19:42:39 - 19:59:59	75	70.5	46	1040
21 de febrero	20:59:11 - 21:18:06	69.5	63.5	54	1135
1 de abril	17:54:44 - 18:09:54	82.5	78.5	51	910
24 de enero	14:09:18 - 14:47:18	92	82	45	2280

Como se mencionó anteriormente, los viajes similares tienen como diferencias los días y hora de registro. En concordancia con eso, tienen entre sus diferencias variables meteorológicas como lo son la radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente, además de la velocidad instantánea del vehículo en cada instante de tiempo del viaje y el ángulo de incidencia del sol en cada superficie del vehículo.

3.2. Recopilación de datos extras a la base de datos

La base de datos obtenida desde el GPS de la flota de taxis eléctricos en estudio no contiene todos los parámetros ambientales de entrada necesarios para implementar el modelo de cargas térmicas, es por esto que es necesario obtener esta información desde otras fuentes.

3.2.1. Obtención de datos desde el explorador solar

Para obtener datos de radiación directa, difusa y velocidad del viento se utilizó la plataforma en línea *Explorador Solar* [33], que corresponde a una plataforma destinada a la entrega de datos meteorológicos. Esta base de datos incluye la irradiancia horaria de 2004 a 2016 a 90 m resolución horizontal sobre Chile continental.

De esta plataforma se extraen los datos de irradiancia (W/m^2), específicamente de las utilizadas en el modelo de cargas térmicas (irradiancia difusa y directa) y la velocidad del viento mediante el uso de los datos TMY, los cuales corresponden a datos para un año meteorológico tipo, es decir, el año que mejor representa (Año representativo: Ar) el comportamiento de estas variables a lo largo del intervalo temporal de la toma de datos. Estos datos son tomados en un intervalo de 60 minutos (cada una hora durante el día) y corresponde a un promedio de valores instantáneos cada 10 minutos.

En relación con los viajes estudiados en este trabajo, se toma un promedio de longitud y latitud igual para los viajes con ruta similar y el viaje largo a analizar. Estos promedios son ingresados en el explorador solar, desde donde se extraen los datos especificados anteriormente. Para aquellos viajes cuya duración se encuentra entre dos horas de datos entregadas por el TMY, se calcula el promedio de estos valores.

Tabla 3.2.1: Longitud y latitud promedio para cada tipo de viaje.

Viaje	Longitud promedio	Latitud promedio
Ruta similar	-70.77	-33.46
Ruta larga	-70.70	-33.52

Tabla 3.2.2: Datos obtenidos desde el explorador solar para cada viaje.

Fecha	Hora	Ar	$I_{dir} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	$I_{dif} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	$V_{viento} \left[\frac{m}{s} \right]$
Viajes ruta similar					
20 de enero	17:00 - 18:00	2014	296	59	4.6
27 de enero	19:00	2014	0	31	3.5
10 de febrero	19:00	2008	0	27	2.6
21 de febrero	20:00 - 21:00	2008	0	0	2.3
1 de abril	17:00 - 18:00	2007	226.4	36.2	3.5
Viaje ruta larga					
24 de enero	14:00 - 15:00	2007	879	94	3.4

3.2.2. Obtención de datos de temperatura ambiente

Para extraer los datos de temperatura ambiente se utilizó la plataforma de la dirección meteorológica de Chile [34], desarrollada por la dirección de aeronáutica civil. Esta plataforma entrega datos de estaciones establecidas en distintos puntos dentro del territorio chileno.

En este caso se extraen los datos diarios de estación automática, que corresponden a registros minutarios llegados desde cada estación. Aquí se obtiene la temperatura ambiente por minuto del día ingresado para la estación seleccionada. Para los viajes se escoge como punto medio la Estación automática de Quinta Normal (código dentro de la plataforma: 330020) cuyas coordenadas son: $-33,44500^\circ$, -70.68278° .

La temperatura escogida para todos los viajes corresponde a la temperatura seca, la cual se caracteriza por no tener en cuenta ni la humedad relativa ni la velocidad del aire, aparte de no verse afectada por la radiación térmica de los objetos que se encuentran próximos. Los valores obtenidos desde esta plataforma se observan en la tabla 3.2.3.

Tabla 3.2.3: Temperatura ambiente promedio para cada viaje.

Viaje	Temperatura ambiente promedio [C]
20 de enero	31.8
27 de enero	33.8
10 de febrero	30.4
21 de febrero	26.5
1 de abril	27.4
24 de enero	27.3

3.2.3. Trazado de rutas y cálculo de distancia total

Para trazar las rutas de cada viaje mediante los datos de longitud y latitud por instante de tiempo del viaje, se utiliza la extensión de Excel Mapas 3D. Respecto al cálculo de la distancia total, se utilizan los mismos datos y se ingresan en la plataforma en línea GPS Visualizer [35]. Las imágenes que respaldan este procedimiento se observan en el Anexo A y C respectivamente. En la tabla 3.2.4, se tiene la distancia total para cada uno de los viajes.

Tabla 3.2.4: Distancia total recorrida por cada viaje.

Viaje	Distancia [km]
20 de enero	10.94
27 de enero	13.01
10 de febrero	12.94
21 de febrero	14.54
1 de abril	13.01
24 de enero	27.19

3.2.4. Obtención de datos geométricos, termodinámicos y características de los materiales de la cabina

Como se verá en el capítulo cinco, existen parámetros de entrada necesarios para el desarrollo del modelo de cargas térmicas. Estos datos se obtienen desde distintas fuentes bibliográficas, entre las que se encuentran [23], [24], [27], [28] y [36]. Estos valores se mostrarán dentro del capítulo 5, con la finalidad de tener continuidad y una mejor comprensión del modelo.

3.3. Confección del modelo de cargas térmicas

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se desarrolla un modelo de cargas térmicas de la cabina, utilizando como referencia los modelos descritos en el capítulo 2. Se profundiza y explica el desarrollo de este modelo en el capítulo 5.

Para la aplicación de este modelo, resulta necesario contar con una referencia, en términos dimensionales, de la cabina del vehículo en estudio, por lo que se realiza un modelo CAD, cuyo procedimiento se describe en el capítulo 4.

Tomando en consideración lo planteado en los alcances del trabajo, el modelo de cargas térmicas toma ciertas simplificaciones que determinan parámetros de entrada específicos, los cuales se detallan a continuación.

1. Se considera que la cabina mantiene en todo momento la temperatura de confort. Esto quiere decir que existe una extracción instantánea por parte del sistema de aire acondicionado del calor que afecta a la mantención de esta temperatura.
2. Para comparar con el modelo lineal desarrollado para el cálculo de la potencia de aire acondicionado, se toma en cuenta que la temperatura de confort para la aplicación del modelo es de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Se considera que no existe una distribución de temperaturas dentro de la cabina en el estado de confort térmico y se toma un promedio de todas estas temperaturas representadas por la temperatura de confort mencionada en el punto anterior.
4. Para la aplicación del modelo, se considera un estado cuasi-estacionario de la cabina.
5. Al no considerar la inercia térmica de los elementos que conforman la cabina (panel, manubrio, elementos electrónicos, asientos, etc) se toman ciertas simplificaciones con la radiación transmitida dentro de esta. Esto determina que, por las características de los viajes de ruta similar y de corta duración, la carga térmica por radiación transmitida no alcanza a generar un cambio en la carga interna de la cabina.
6. Para las superficies de la cabina, se consideran adiabáticas la zona del panel frontal, piso de la cabina y el maletero.
7. El modelo se basa en el método de balance de calor, por lo que se utiliza un volumen de control para la cabina.

La aplicación del modelo para cada viaje se realiza en el programa Excel. Para esto se utilizan los datos cada cinco segundos que entrega la base de datos de los viajes seleccionados. En este modelo se integran tanto los datos obtenidos de la base de datos, como los datos entregados por el explorador solar y la dirección meteorológica. El cálculo de la potencia de aire acondicionado por cada instante de tiempo del viaje \dot{Q}_{AC} se realiza para dos comportamientos de la convección interna de la cabina. Se toman valores para el coeficiente convectivo interno en convección natural y media. Se considera esto debido a el desconocimiento del comportamiento del flujo de aire acondicionado dentro de la cabina.

Siguiendo con lo anterior, para el caso de la convección media se toman valores que serán detallados en el capítulo 5. Para el caso de convección natural, se utilizan las ecuaciones descritas en antecedentes. Como se observa en la fórmula para el numero de Grashof, se necesita una temperatura de superficie para calcular el coeficiente convectivo interno del instante número uno del viaje. Debido a que es necesario el coeficiente convectivo interno para calcular la temperatura de superficie, se debe realizar una iteración, asumiendo una temperatura de superficie $T_{S2}[0]$ y así obtener el coeficiente convectivo interno del instante cero. Con este valor se calcula la temperatura de superficie del instante uno y así sucesivamente. Con estos valores se puede calcular la carga convectiva interna de la cabina. Esto se resume en la figura 3.3.1.

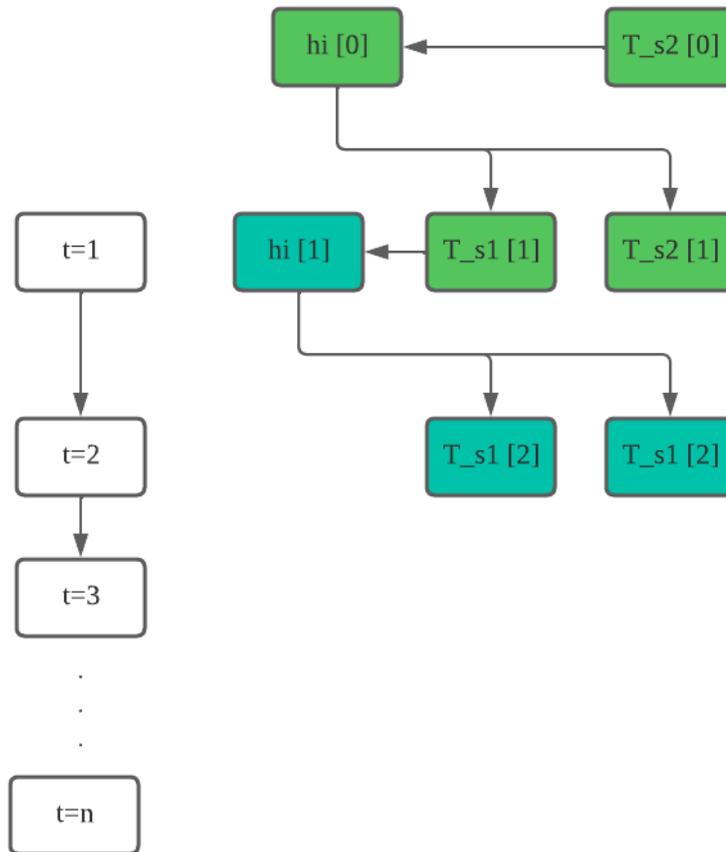


Figura 3.3.1: Esquema del proceso de iteración para el cálculo del coeficiente convectivo interno y temperaturas de superficie.

Como se observa en la figura anterior, se utiliza la convención T_{S2} T_{S1} , esto corresponde a las temperaturas de superficie interna y externa, respectivamente, de las superficies de la cabina. Estos términos se desarrollan y explican con mayor profundidad en el capítulo 5.

Con el modelo listo, se extraen los resultados desde Excel y la representación de estos se realiza mediante el uso de Python y sus librerías Pandas, Numpy y Matplotlib. Esto se realiza en la plataforma de código abierto Jupyter Notebook.

Capítulo 4

Creación de la geometría de la cabina

Para la aplicación del modelo de cargas térmicas de la cabina, resulta necesario contar con una geometría 3D que permita obtener información sobre las dimensiones de esta. Para esto, al igual que el método utilizado por Marcos y Fayazbakhsh - Bahrami, se utiliza el formato de polígono o PLY (Polygon File Format) para la cabina, donde se considera que todas las superficies que la conforman son planas.

Con esa simplificación, mediante el programa Autodesk Inventor Profesional se importa el modelo 3D disponible del vehículo Hyundai Ioniq 2019 (Figura 4.0.1).



Figura 4.0.1: Modelo 3D del vehículo Hyundai Ioniq 2019.

Utilizando las herramientas de este programa, se crea un boceto sobre cada una de las superficies que forman parte de la cabina, respetando en lo posible todos los ángulos y dimensiones originales del modelo 3D. El polígono obtenido mediante este procedimiento y las distintas superficies que lo conforman se observan en la figura 4.0.2.

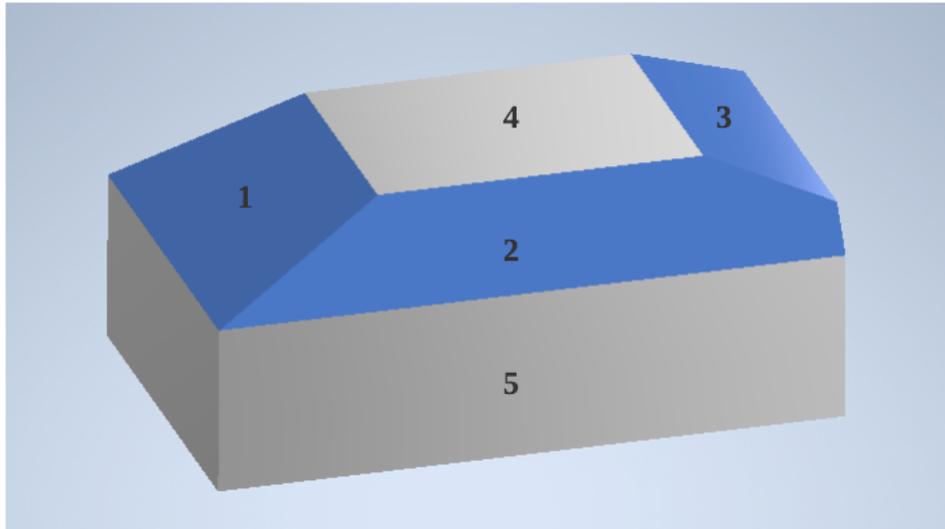


Figura 4.0.2: Polígono de la cabina. (1) Parabrisas, (2) Ventanas laterales, (3) Ventana trasera, (4) Techo y (5) Puertas.

De este polígono se obtiene información necesaria sobre las dimensiones aproximadas de las superficies que conforman la cabina. Sin embargo, en algunas superficies se toman algunas aproximaciones para obtener el ancho y largo de cada una. Estas simplificaciones se realizan principalmente en las superficies transparentes (Parabrisas, Ventana trasera y ventanas laterales) ya que, como se puede observar en el polígono obtenido, estas presentan geometrías trapezoidales. Considerando que en términos de la transferencia de calor hacia la superficie la convención entre largo y ancho de la superficie cambia, se toma como largo de cada una de estas la distancia entre las aristas horizontales de esa cara, mientras que para el ancho se saca el promedio de ambas aristas. Con estas consideraciones, los parámetros geométricos extraídos del polígono se observan en la tabla 4.0.1, donde se usa la notación \angle para representar el ángulo medido desde la vertical a la superficie, en grados.

Tabla 4.0.1: Parámetros geométricos obtenidos desde el polígono de la cabina.

Superficie	Área [m^2]	Perímetro [m]	Largo [m]	Ancho [m]	\angle
Parabrisas	1.47	5.1	0.98	1.5	60
Ventana trasera	0.9	4.1	0.7	1.4	55
Ventanas	1.4	6.6	0.6	2.3	20
Techo	1.9	5.6	1.2	1.6	90
Puertas	2.5	7.8	0.8	3.1	0

Capítulo 5

Modelo térmico de la cabina

El flujo de calor y su transferencia hacia a la cabina del vehículo se observa en la figura 5.0.1. Este modelo considera los flujos de calor entrantes desde todas las superficies que componen el vehículo. También se considera el flujo de calor corporal del pasajero, conocido como carga metabólica.

Como se describió en el capítulo 2, el modelo de cabina a utilizar corresponde a un polígono confeccionado a partir del modelo del vehículo en estudio. Dentro de este modelo se considera que la zona del maletero, el suelo de la cabina y el panel frontal del vehículo son adiabáticos, es decir, no existe intercambio de calor entre estas superficies y el ambiente.

Este modelo de cargas térmicas considera una distinción entre superficies opacas (techo y puertas) y superficies transparentes (parabrisas, ventana trasera, ventanas laterales). Cada una de estas superficies intercambian calor de forma distinta con el interior de la cabina.

En términos generales, la ganancia de calor total en el tiempo será la suma de todos los tipos de carga dentro de la cabina, lo cual se modela mediante la ecuación 5.1.

$$\dot{Q}_{cab_{total}} = \sum_{sup} \dot{Q}_{cv_{in}} + \sum_{sup} \dot{Q}_{rad,\tau} + \dot{Q}_{met} + \dot{Q}_{AC} \quad (5.1)$$

Donde $\dot{Q}_{cv_{in}}$ es el flujo de calor entre el ambiente y la cabina, $\dot{Q}_{rad,\tau}$ es el flujo de radiación transmitida, \dot{Q}_{met} es la carga metabólica, y \dot{Q}_{AC} es la carga de aire acondicionado, todos en [W].

Además, de acuerdo con conservación de la energía, el cambio en la temperatura de la cabina se rige por la siguiente ecuación:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{\sum_{sup} \dot{Q}_{cv_{in}} + \sum_{sup} \dot{Q}_{rad,\tau} + \dot{Q}_{met} + \dot{Q}_{AC}}{m_c \cdot C_c} \quad (5.2)$$

Donde T_c es la temperatura de la cabina en [K] en , m_c es la masa de aire de la cabina en

[kg] y C_c es el calor específico del aire en $[\frac{J}{kgK}]$

Dado que en este modelo se trabaja bajo el supuesto de que la temperatura del aire de la cabina se mantiene constante y uniforme en la temperatura de confort y que, además, se quiere estimar la carga de aire acondicionado necesaria para mantener ese estado, la temperatura de la cabina no varía en el tiempo. De acuerdo con esto, y siguiendo lo planteado por la ecuación 5.2, la carga de aire acondicionado se define de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{AC} = -(\sum_{sup} \dot{Q}_{cvin} + \sum_{sup} \dot{Q}_{rad,\tau} + \dot{Q}_{met}) \quad (5.3)$$

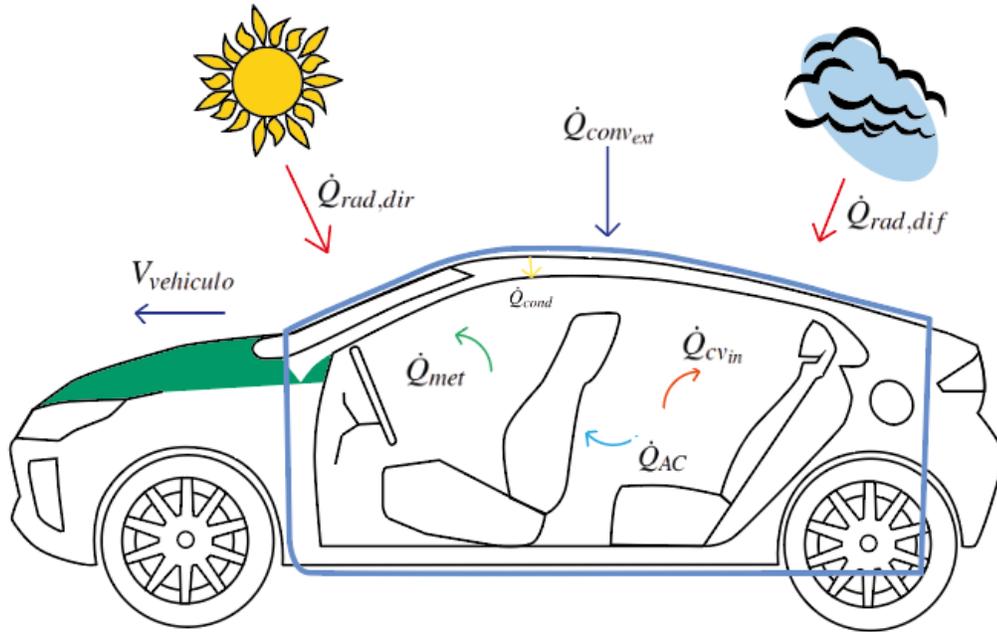


Figura 5.0.1: Esquema del modelo térmico propuesto para las cargas térmicas de la cabina.

A continuación se procede a describir el flujo de calor en cada una de las superficies.

5.1. Flujo de calor desde superficies opacas para un instante de tiempo: $\dot{Q}_{cvin,op}$

Este modelo se aplica para las superficies opacas consideradas en el modelo de cargas térmicas de la cabina, entre las cuales se encuentran las puertas izquierda y derecha, además del techo.

En superficies opacas, la transmisión de radiación es nula, por lo cual no existe un aporte directo de esta componente hacia el aire de la cabina. Sin embargo, la radiación realiza su aporte mediante la absorción de esta por la superficie, la cual se representa mediante la

siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{rad\alpha,op} = A_{op} \cdot \alpha_{op} \cdot (\dot{I}_{dir} \cdot \cos(\theta) + \dot{I}_{dif}) \quad (5.4)$$

Donde $\dot{Q}_{rad\alpha,op}$ corresponde a flujo de calor por radiación absorbida por la superficie en W, A_{op} es el área de la superficie opaca en m^2 , α_{op} es la absorptividad de la superficie, \dot{I}_{dir} y \dot{I}_{dif} corresponden a la irradiancia directa y difusa en $\frac{W}{m^2}$ y θ es el ángulo entre la normal a la superficie y la posición del sol en el cielo.

Tabla 5.1.1: Coeficientes de radiación absorbida para superficies opacas [24].

Parámetro	Techo	Puertas
Absortividad α (pintura blanca)	0.14	0.14

Es importante considerar que en este tipo de superficie hay una diferencia considerable de temperatura entre la cara exterior e interior del techo o puertas, debido a los diferentes materiales que componen estas superficies. En este caso, las superficies opacas se conforman por una capa de acero correspondiente a la carrocería, seguida de una capa de aire y finalmente una capa de algodón [24].

En la tabla 5.1.2 se observan las propiedades y características de estas capas tanto para el techo como para las puertas. En este modelo se considera que el espesor total de las puertas es igual a 1,5 veces el espesor del techo, viéndose reflejado este aumento de tamaño en la capa de aire que conforma la superficie.

Tabla 5.1.2: Dimensiones, conductividad térmica y resistencia equivalente para las distintas superficies opacas [24].

Parámetro	Techo	Puertas	Unidad
e_{acero}	0.0005	0.0005	m
e_{aire}	0.0045	0.0095	
$e_{algodón}$	0.005	0.005	
k_{acero}	14.9		$\frac{W}{mK}$
k_{aire}	0.0263		
$k_{algodón}$	0.035		
R	0.31	0.5	$\frac{m^2K}{W}$

Para calcular el calor que entra a la cabina desde la superficie opaca $\dot{Q}_{cv, in, op}$ se realiza un balance de energía entre lo que entra a la superficie y lo que sale de esta. Para simplificar los cálculos, se utiliza el concepto de resistencias equivalentes, donde se toma en cuenta que las capas que conforman la superficie se encuentran dispuestas en serie, lo cual permite reducir

la ecuación de conducción a solo una, utilizando solo dos temperaturas de superficie, una externa y otra interna. Lo descrito anteriormente se visualiza en la figura 5.1.1.

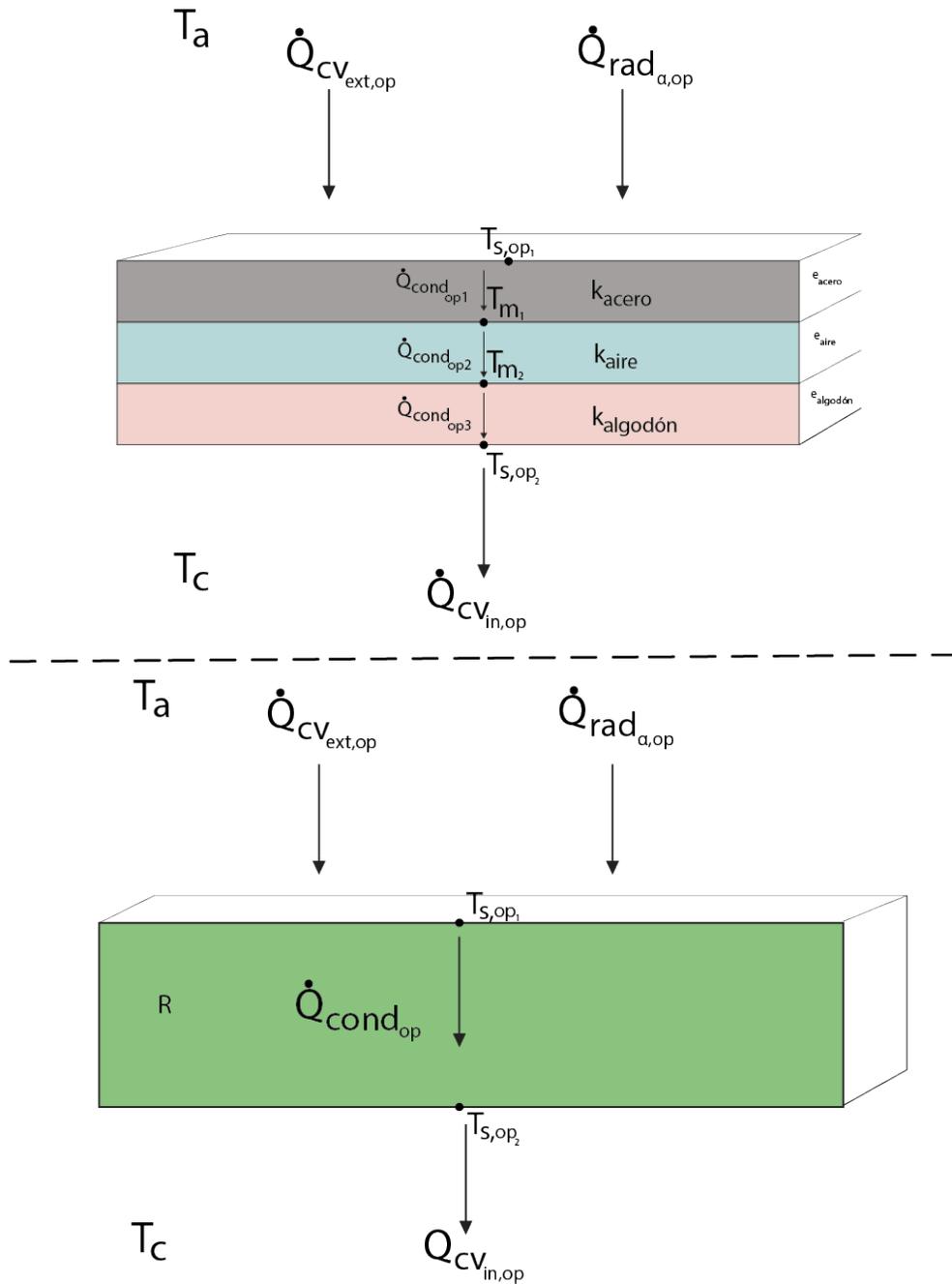


Figura 5.1.1: Esquema del balance térmico en superficies opacas.

Las ecuaciones que rigen este balance quedan de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{cv_{ext,op}} + \dot{Q}_{rad_{\alpha,op}} = \dot{Q}_{cond_{op}} \quad (5.5)$$

$$\dot{Q}_{cond,op} = \dot{Q}_{cvin,op} \quad (5.6)$$

Para determinar las temperaturas de superficie externa e interna se hace un despeje utilizando las dos ecuaciones del balance de calor más las ecuaciones para cada tipo de transferencia de calor involucrada en el proceso, las cuales se definen de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{cvext,op} = A_{op} \cdot h_e \cdot (T_a - T_{s,op1}) \quad (5.7)$$

$$\dot{Q}_{cond,op} = \frac{A_{op}}{R} \cdot (T_{s,op1} - T_{s,op2}) \quad (5.8)$$

$$\dot{Q}_{cvin,op} = A_{op} \cdot h_i \cdot (T_{s,op2} - T_c) \quad (5.9)$$

$$R = \frac{e_{acero}}{k_{acero}} + \frac{e_{aire}}{k_{aire}} + \frac{e_{algodon}}{k_{algodon}} \quad (5.10)$$

Con estas cinco ecuaciones y cinco incógnitas, las ecuaciones que permiten calcular la temperatura externa e interna corresponden a la 5.11 y 5.12, respectivamente. Aquí se simplifica el término $\dot{I}_{dir} \cdot \cos(\theta) + \dot{I}_{dif}$ por \dot{I}_{tot} .

$$T_{s,op1} = \frac{h_i \cdot (R \cdot T_a \cdot h_e + T_c + \alpha_{op} \cdot R \cdot \dot{I}_{tot}) + T_a \cdot h_e + \alpha_{op} \cdot \dot{I}_{tot}}{h_i \cdot (R \cdot h_e + 1) + h_e} \quad (5.11)$$

$$T_{s,op2} = \frac{h_i \cdot (R \cdot T_c \cdot h_e + T_c) + T_a \cdot h_e + \alpha_{op} \cdot \dot{I}_{tot}}{h_i \cdot (R \cdot h_e + 1) + h_e} \quad (5.12)$$

5.2. Flujo de calor en superficies transparentes en un instante de tiempo: $\dot{Q}_{cvin,t}$, $\dot{Q}_{rad\tau}$

Este modelo se aplica para las superficies transparentes consideradas en el modelo de cargas térmicas de la cabina, entre las cuales se encuentran el parabrisas, la ventana trasera y las ventanas laterales (izquierda y derecha).

En superficies transparentes, existe un porcentaje de la radiación incidente que es transmitida directamente a la cabina $\dot{Q}_{rad\tau}$, la cual se representa mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{rad\tau} = A_t \cdot \tau_i \cdot (\dot{I}_{dir} \cdot \cos(\theta) + \dot{I}_{dif}) \quad (5.13)$$

Sin embargo, la radiación transmitida no calienta directa e instantáneamente al aire de la cabina. Esta incide sobre los cuerpos que se encuentran dentro, los cuales después de pasado

el tiempo de viaje comienzan a liberar este calor influyendo en el aumento de la carga térmica de la cabina. Por esta razón, este flujo de calor solo será considerado en viajes largos, para un vehículo que lleva cierto tiempo viajando expuesto al sol y que puede ver reflejado el efecto de esta radiación en el aire de la cabina.

Tabla 5.2.1: Coeficientes de radiación absorbida y transmitida para superficies transparentes [24].

Parámetro	Parabrisas	Ventana trasera	Ventanas laterales
Absortividad	0.302	0.589	0.325
Transmisividad	0.452	0.311	0.475

Similar al modelo de superficies opacas, para calcular el flujo de calor entre el ambiente y la cabina, $\dot{Q}_{cv,in,t}$, se realiza un balance de energía, considerando los flujos que entran y los que salen de la superficie.

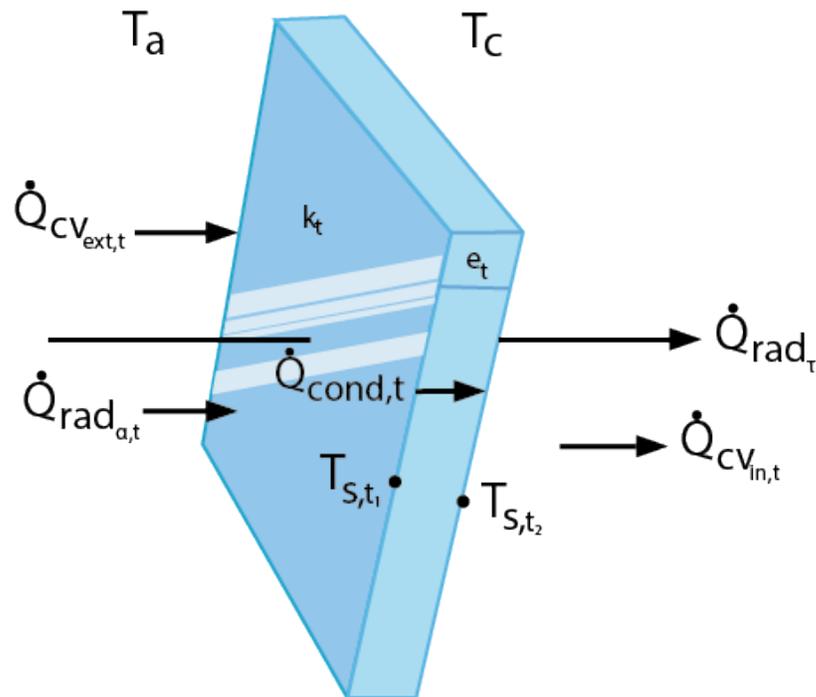


Figura 5.2.1: Esquema del balance térmico en superficies transparentes.

Pese a que el gradiente de temperatura dentro del vidrio es casi nulo, se considerara la

conducción de igual manera para seguir un modelo que siga la misma línea que el modelo para superficies opacas. El balance energético dentro de las superficies transparentes se puede expresar mediante las ecuaciones 5.14 y 5.15.

$$\dot{Q}_{cv_{ext},t} + \dot{Q}_{rad_{\alpha},t} = \dot{Q}_{cond,t} \quad (5.14)$$

$$\dot{Q}_{cond,t} = \dot{Q}_{cv_{in},t} \quad (5.15)$$

Como la radiación transmitida desde el exterior a la cabina entra en su totalidad, esta no tiene efecto en el balance térmico del vidrio.

Tal como en el despeje para las temperaturas de superficies opacas, se utilizan las ecuaciones de balance de calor, además de las ecuaciones para cada tipo de transferencia de calor involucrada en el proceso, las cuales se definen de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{cv_{ext},t} = A_t \cdot h_e \cdot (T_a - T_{s,t_1}) \quad (5.16)$$

$$\dot{Q}_{cond,t} = \frac{A_t}{R} \cdot (T_{s,t_1} - T_{s,t_2}) \quad (5.17)$$

$$\dot{Q}_{cv_{in},t} = A_t \cdot h_i \cdot (T_{s,t_2} - T_c) \quad (5.18)$$

$$\dot{Q}_{rad_{\alpha},t} = A_t \cdot \alpha_t \cdot (\dot{I}_{dir} \cdot \cos(\theta) + \dot{I}_{dif}) \quad (5.19)$$

Así, se obtienen las ecuaciones para la superficie exterior e interior del vidrio:

$$T_{s,t_1} = \frac{h_i \cdot (T_a \cdot h_e \cdot e_t + \alpha_t \cdot e_t \cdot \dot{I}_{tot} + T_c \cdot k_t) + k_t \cdot (T_a \cdot h_e + \alpha_t \cdot \dot{I}_{tot})}{h_i \cdot (e_t \cdot h_e + k_t) + h_e \cdot k_t} \quad (5.20)$$

$$T_{s,t_2} = \frac{h_i \cdot T_c \cdot (h_e \cdot e_t + k_t) + k_t \cdot (\alpha_t \cdot \dot{I}_{tot} + T_a \cdot h_e)}{h_i \cdot (h_e \cdot e_t + k_t) + h_e \cdot k_t} \quad (5.21)$$

Tabla 5.2.2: Conductividad térmica y espesores para cada una de las superficies transparentes.

Parámetro	Valor	Unidad
Conductividad térmica del vidrio k_t	1.4	$\frac{W}{mK}$
Espesor del parabrisas	0.006	m
Espesor ventana trasera	0.005	
Espesor ventanas laterales	0.003	

5.3. Coeficiente convectivo interno: h_i

Los coeficientes convectivos, tanto internos como externos, dependen de la orientación de la superficie y la velocidad del aire. En el caso del coeficiente convectivo interno, si la temperatura de la cabina ya se encuentra en la temperatura de confort es porque el aire acondicionado se encuentra funcionando. Debido a lo complejo que resulta definir si la convección que se está dando dentro de la cabina es de tipo natural o forzada, el modelo se pone en dos casos:

1. Convección natural
2. Convección media (entre natural y forzada)

En el caso de la convección natural, se consideran las ecuaciones entre la 2.17 y 2.23, descritas en el capítulo 2. Respecto a las relaciones del número de Nusselt para cada tipo de superficie, se toma en cuenta lo siguiente:

- Placa vertical : Esta relación se aplica para las puertas de la cabina.
- Placa inclinada: Esta fórmula se utiliza para el parabrisas, ventana trasera y ventanas laterales.
- Placa horizontal: Se aplica para para el techo de la cabina.

Para el cálculo del número de Grashof, se utilizan los valores presentados en la tabla 5.3.1, para cada uno de los parámetros.

Tabla 5.3.1: Propiedades del fluido y parámetros para el calculo del número de Grashof [36].

Parámetro	Valor	Unidad
g	9.8	$\frac{m}{s^2}$
beta	0.003378	$\frac{1}{K}$
$T_\infty = T_c$	297.15	K
ν	1.54e10-5	$\frac{m^2}{s}$
Pr	0.7	-
k_{aire}	0.0263	$\frac{W}{mK}$

En el caso de la convección media se obtiene el coeficiente de convección externa mínimo para cada viaje y se saca un promedio de estos, utilizándolo para todos los viajes, cuyo valor es de $7.53 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Este valor se obtiene de la ecuación 5.22 que se define a continuación. Según ese modelo, ese coeficiente convectivo representa una velocidad promedio del aire de la cabina de $1.1 \frac{m}{s}$ aproximadamente.

5.4. Coeficiente convectivo externo: h_e

Como se mencionó anteriormente, el coeficiente convectivo depende de la superficie y la velocidad del fluido. Para la convección externa, se utiliza la estimación propuesta por Fayabakhsh (2013), donde se considera que la convección externa es del tipo forzada, cuyo coeficiente convectivo depende de la velocidad del vehículo.

$$h_e = 0.6 + 6.64 \cdot \sqrt{V} \quad (5.22)$$

Donde h_e es el coeficiente convectivo externo en $\frac{W}{m^2K}$ y V es la velocidad del vehículo en $\frac{m}{s}$. Para esto se considera que el aire de la cabina es estacionario y que la velocidad del viento fuera de la cabina es igual a la velocidad del vehículo. Por lo tanto, en el caso en que el vehículo se encuentre detenido, es decir, tenga una velocidad instantánea de $0 \frac{m}{s}$, se utiliza dentro de la ecuación, la velocidad del viento promedio obtenida desde el explorador solar para el día del viaje.

5.5. Flujo de calor metabólico: \dot{Q}_{met}

La actividad metabólica dentro del cuerpo humano crea de forma constante calor y humedad. Este calor sale a través de los tejidos corporales y se libera a la cabina del vehículo, aportando a la suma de cargas térmica dentro de la cabina. La carga metabólica se define por la ecuación 5.23.

$$\dot{Q}_{met} = \sum_{ocupantes} M \cdot A_{Dubois} \quad (5.23)$$

Donde M corresponde a la tasa de calor metabólico producida por el pasajero en $\frac{W}{m^2}$. Estas tasas se basan en varios criterios, dentro de lo que se encuentra el nivel de actividad de la persona. Además, dentro de la ecuación se encuentra el área de Dubois, la cual corresponde a una estimación del área de la superficie del cuerpo en función de la altura y peso de la persona. El área de Dubois se rige por la fórmula 5.24.

$$A_{Du} = 0.007184 \cdot (W)^{0.425} \cdot (H)^{0.725} \quad (5.24)$$

Donde W , corresponde al peso de la persona en kg y H a la altura en centímetros. Para este modelo se considera un chofer y una pasajera. Para determinar los pesos y estaturas de cada ocupante se utilizan datos estadísticos para el peso de un hombre y una mujer promedio en Chile [37]. La tasa metabólica, peso y altura de los ocupantes, el área de Dubois y la carga metabólica final, calculada utilizando la ecuación 5.23, se observan en la tabla 5.5.1.

Tabla 5.5.1: Tasa de calor metabólico, peso, altura, área de Dubois y carga metabólica final para chofer y pasajera [23], [37].

Parámetro	Chofer	Pasajera	Unidad
$M_{c,p}$	85	55	$\frac{W}{m^2K}$
Peso	82.8	71.5	kg
Altura	173	159	cm
A_{Du}	1.97	1.74	m^2
\dot{Q}_{met}	167.31	95.68	W

5.6. Cálculo del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre cada superficie de la cabina

La cantidad de radiación que llega a cada una de las superficies determina la carga térmica final dentro de la cabina. Esta cantidad de radiación se estima mediante la irradiancia o componente directa de la radiación y el ángulo con el que incide el haz de radiación en cada superficie de la cabina.

Para el cálculo del ángulo de incidencia, se toman en cuenta los conceptos y ecuaciones que van desde la 2.25 hasta 2.35, descritas en el capítulo 2.

Respecto a la posición angular, observando las expresiones mostradas en la tabla 2.1, se considera la convención para año bisiesto ya que el año 2020, cuando se realizaron los viajes seleccionados, posee esta característica.

Para el cálculo del tiempo solar verdadero, se considera como GMT -3, ya que los viajes se realizaron entre los meses de enero y abril cuando aún no ocurre el cambio de horario a -4. Respecto a la longitud geográfica del meridiano del lugar, se utiliza la longitud en cada instante de tiempo del viaje. Con estas consideraciones y el valor del tiempo solar verdadero, se calcula el ángulo horario.

Finalmente, para calcular el ángulo generado entre el haz de radiación y la normal de la superficie a estudiar, se utiliza la ecuación 2.35. En esta, aparecen parámetros que deben tomar en consideración los alcances y características dadas para cada viaje. Respecto a la latitud, se considera la latitud para cada instante de tiempo del viaje, lo cual entrega en conjunto con el ángulo horario, un valor para el ángulo de incidencia en cada instante de tiempo. Para el caso de la cabina utilizada, los valores para β_z se observan en la tabla 5.6.1.

Tabla 5.6.1: Ángulos respecto a la horizontal para cada una de las superficies de la cabina, en grados.

Superficie	β_z
Parabrisas	27.43
Ventana trasera	21.53
Ventana izquierda y derecha	55
Puerta izquierda y derecha	90
Techo	0

Finalmente, en el caso del azimut de superficie, este puede ser comprendido de forma sencilla con la figura 5.6.1, donde se observa la medición de γ para la ventana derecha, cuando la cabina se encuentra en dirección Sur-Norte.

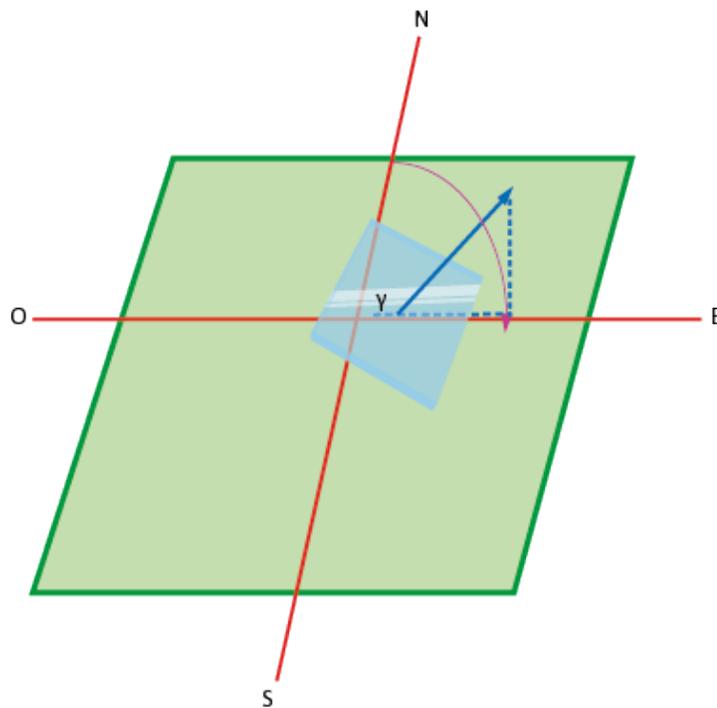


Figura 5.6.1: Ejemplo de medición del ángulo azimut de superficie para la ventana derecha.

Al escoger la simplificación de que los viajes se realizan en todo momento siguiendo una trayectoria de sur a norte, los ángulos azimut de superficie o γ , para cada una de las superficies, se observan en la tabla 5.6.2.

Tabla 5.6.2: Valores de γ para cada una de las superficies, en grados

Superficie	γ
Parabrisas	-180
Ventana trasera	0
Ventana y puerta izquierda	-90
Ventana y puerta derecha	90

De esta manera, se tienen los ángulos necesarios para hacer el cálculo del ángulo de incidencia del haz de radiación sobre una superficie arbitraria. Notar que para el techo, como se observa en la figura 2.7.3, este ángulo corresponde al ángulo cenital Z_o .

En la figura 5.6.2 se presenta un esquema que resume el procedimiento explicado anteriormente.

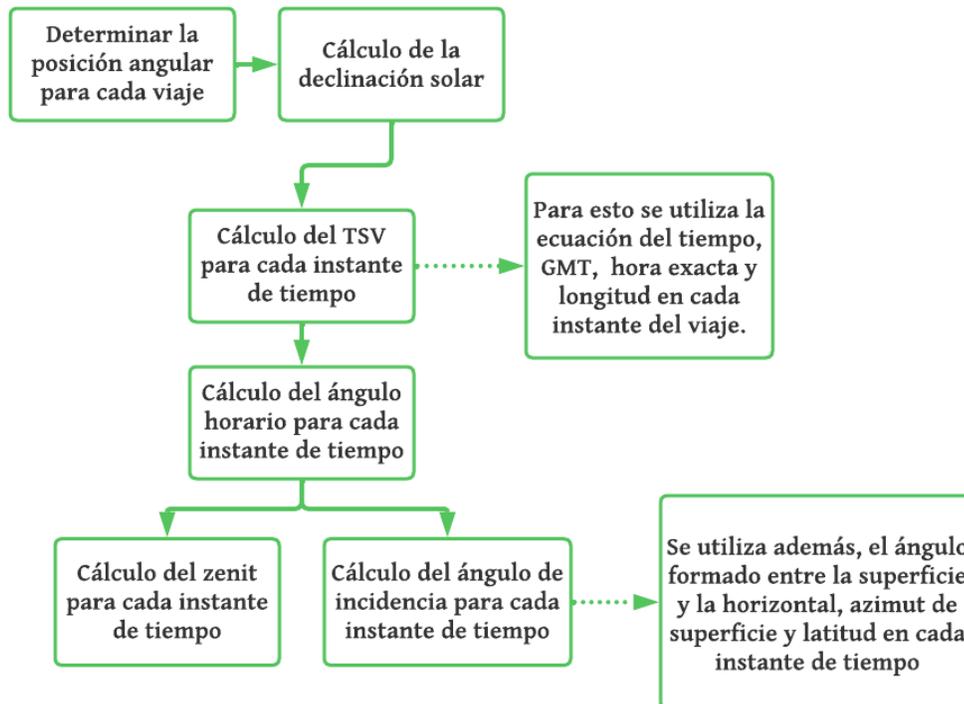


Figura 5.6.2: Esquema resumen del procedimiento para el cálculo del ángulo de incidencia del haz de radiación solar en una superficie.

Capítulo 6

Cálculo de resultados

6.1. Cálculo del consumo energético por el sistema de climatización

Por cada viaje, se tiene la potencia de aire acondicionado en cada instante de tiempo. Esto permite calcular el consumo energético para cada instante de tiempo mediante la siguiente ecuación:

$$E_{AC}(t) = \dot{Q}_{AC}(t) \cdot \Delta t \quad (6.1)$$

Donde $E_{AC}(t)$ corresponde al consumo energético del sistema de climatización para cada instante de tiempo, $\dot{Q}_{AC}(t)$ es la potencia de climatización para cada instante y Δt es el paso de tiempo entre un instante y otro, el cual para estos viajes corresponde a cinco segundos. Para el cálculo, este paso de tiempo se transforma a horas y las unidades de medida de la energía por instante de tiempo queda en kWh.

La relación anterior permite calcular el consumo energético total por el sistema de climatización mediante la sumatoria de cada uno de estos consumos, entre el momento inicial y final del viaje.

$$E_{AC_{total}} = \sum_{t_0}^{t_f} E_{AC}(t) \quad (6.2)$$

Donde, $E_{AC_{total}}$ corresponde al consumo total por el sistema de climatización para cada viaje. Además, t_0 y t_f corresponde al instante inicial y final del viaje.

6.2. Cálculo del consumo energético total por viaje

Para el cálculo del consumo energético total por viaje se considera la variación en el estado de carga (SOC) y la capacidad de la batería que, como se mencionó anteriormente,

corresponde a 28 kWh. En términos simples, el ΔSOC de un viaje se divide en el SOC consumido por los sistemas que más relevancia tienen dentro del vehículo en términos de consumo: el sistema de climatización y el sistema de tracción del vehículo. Por lo tanto, la energía total del viaje también se divide en esas dos categorías. Esto se relaciona mediante la siguiente ecuación:

$$E_{total} = \Delta SOC \cdot C_{total,bateria} \quad (6.3)$$

6.2.1. Cálculo del consumo energético total teórico por el sistema de tracción

Dentro del modelo propuesto por Mebarki (2013) en el que se considera que la potencia total requerida por el vehículo en cada instante de tiempo es la suma entre la potencia de tracción y la potencia de climatización o aire acondicionado (ecuación 2.3). Aquí, la potencia de tracción queda determinada por la ecuación 6.4.

$$P_{TC} = V \cdot (M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot A_f \cdot C_d + M \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \quad (6.4)$$

Donde, V es la velocidad del vehículo, g es la aceleración de gravedad, ρ_a es la densidad del aire, A_f es el área frontal del vehículo, C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámica, M es la masa total del vehículo, y f_r el coeficiente de resistencia a la rodadura y α el ángulo de inclinación del vehículo respecto a la horizontal.

Los valores de cada uno de estos parámetros que permiten calcular la potencia de tracción, se observan en la tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1: Parámetros para el cálculo de potencia del sistema de tracción del vehículo [39], [38].

Parámetros	Valor	Unidad
Área frontal	2.05	m^2
Coeficiente de arrastre	0.24	-
Coeficiente de resistencia a la rodadura	0.013	-
Densidad del aire	1.293	$\frac{kg}{m^3}$
Aceleración gravitacional	9.8	$\frac{m}{s^2}$
Masa	1970	kg

6.3. Porcentaje de energía consumida por el sistema de climatización

Para estimar que cantidad de energía que se consumió por parte del sistema de climatización en relación al consumo total del vehículo, se hace uso de los valores entregados por las ecuaciones 6.3 y 6.2, las cuales se relacionan mediante la ecuación 6.5.

$$\%E_{AC} = \frac{E_{AC_{total}}}{E_{total}} \cdot 100 \quad (6.5)$$

6.4. Parámetros para medir eficiencia del sistema de climatización por viaje

Existen dos formas de medir la eficiencia del sistema de climatización. La primera corresponde al consumo energético por kilometro recorrido en el viaje ($\frac{kWh}{km}$) (ecuación 6.6) y la segunda, al consumo energético cada 100 km [kWh] (ecuación 6.7).

$$C_{e,km} = \frac{E_{AC_{total}}}{D_{total}} \quad (6.6)$$

$$C_{e,100km} = \frac{E_{AC_{total}}}{D_{total}} \cdot 100 \quad (6.7)$$

Capítulo 7

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en base a los objetivos planteados y la metodología descrita en los capítulos anteriores. Es importante destacar que, debido a las características de los viajes, siempre se requiere enfriar la cabina, por lo tanto se utiliza el concepto de AC (Aire Acondicionado). Sin embargo, dentro de los capítulos que siguen, cuando se utilicen términos como HVAC o climatización, se estará haciendo referencia a la carga térmica para enfriar la cabina.

7.1. Potencia de aire acondicionado en el tiempo de viaje

En las figuras desde la 7.1.1 a la 7.1.6, se observan las curvas de potencia eléctrica de aire acondicionado a través del tiempo de viaje. En cada gráfico se presentan tres curvas, dos corresponden al modelo de cargas térmicas desarrollado en el capítulo 5, considerando convección natural y media dentro de la cabina y se observa la curva de potencia obtenida mediante el modelo lineal que se define con la ecuación 2.5. Para el caso de las curvas de potencia obtenidas desde el modelo de cargas térmicas, estas son transformadas desde potencia térmica a potencia eléctrica, utilizando la eficiencia del compresor eléctrico del sistema HVAC.

Estos viajes se dividen por la ruta y el rango horario donde se desarrollan, esto principalmente a la magnitud de la carga por radiación que presentan unos respecto a los otros.

7.1.1. Viajes con ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas

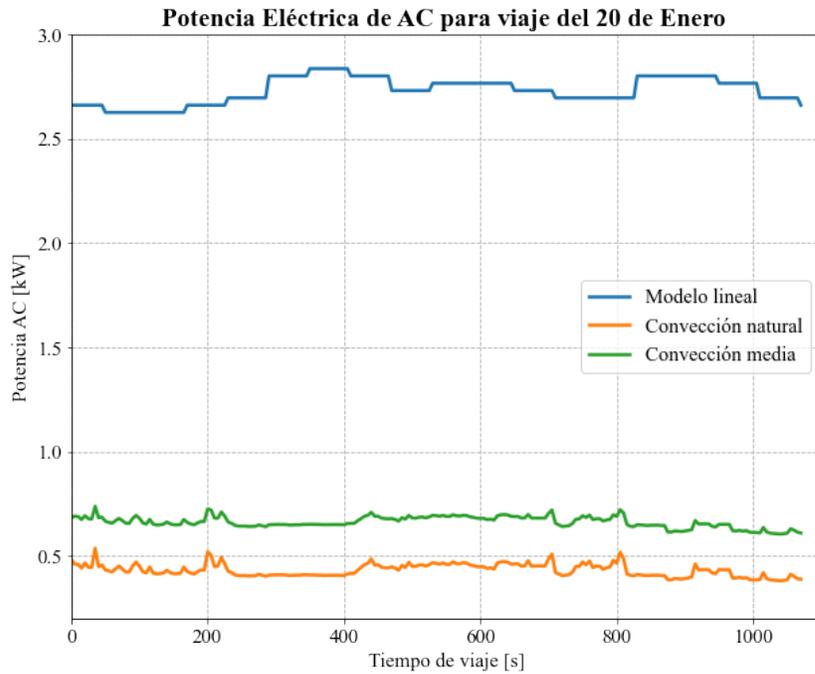


Figura 7.1.1: Potencia de aire acondicionado durante el tiempo para el viaje del 20 de enero.

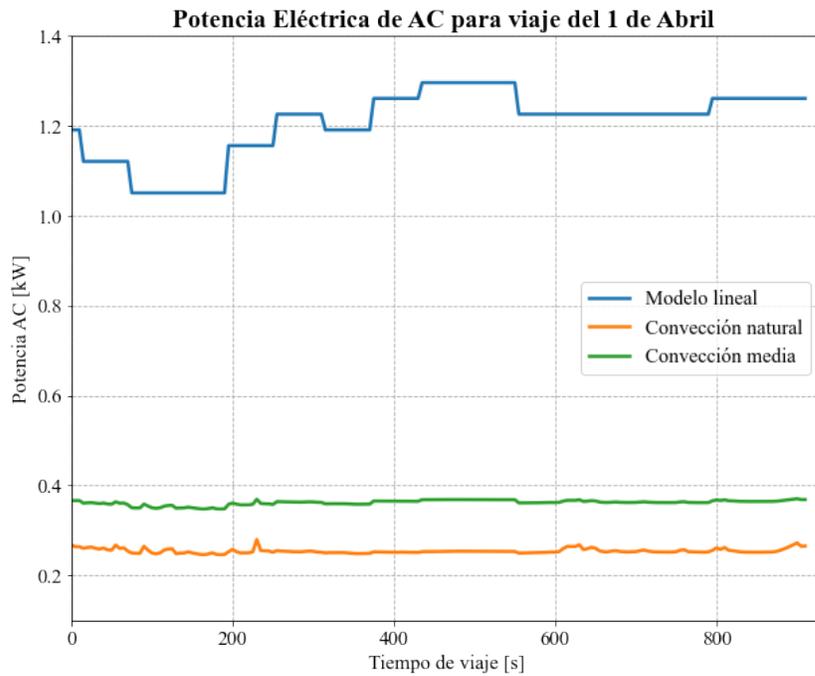


Figura 7.1.2: Potencia de aire acondicionado durante el tiempo para el viaje del 1 de abril.

7.1.2. Viajes con ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas

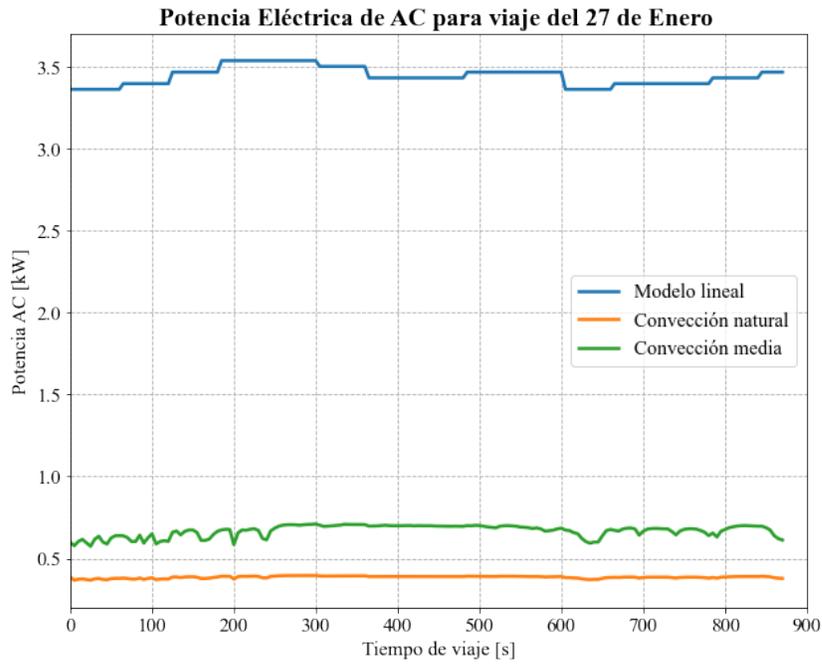


Figura 7.1.3: Potencia de aire acondicionado durante el tiempo para el viaje del 27 de enero.

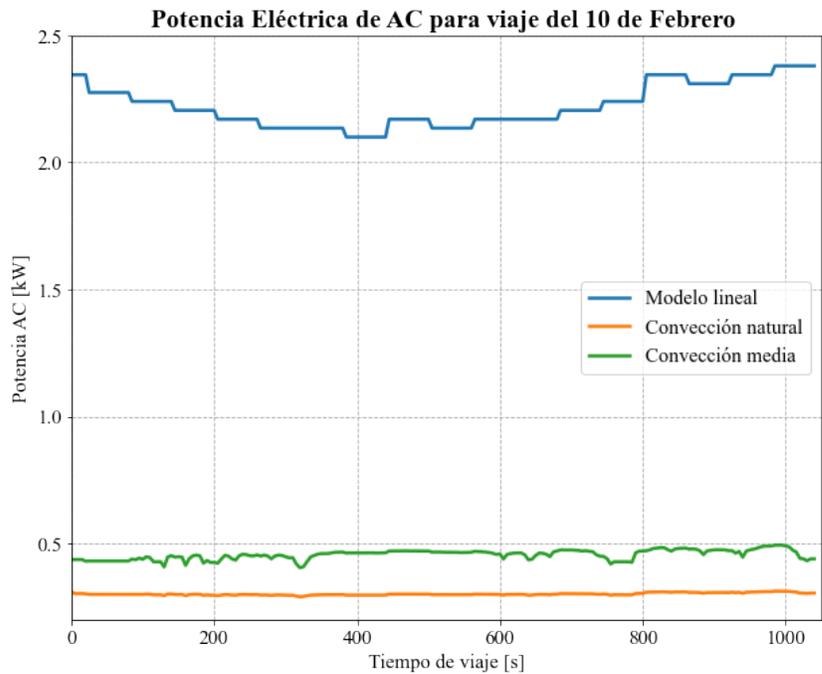


Figura 7.1.4: Potencia de aire acondicionado durante el tiempo para el viaje del 10 de febrero.

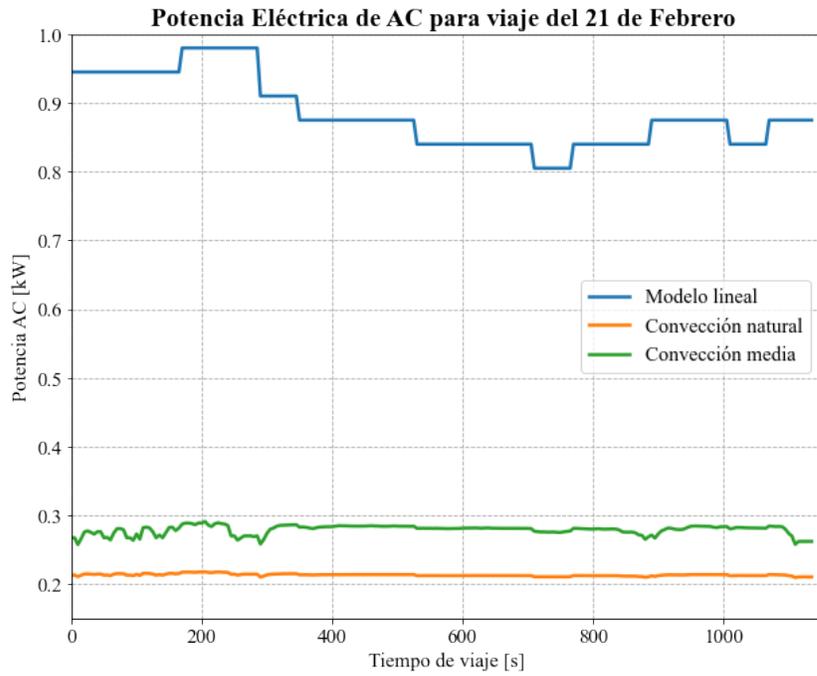


Figura 7.1.5: Potencia de aire acondicionado durante el tiempo para el viaje del 21 de febrero.

7.1.3. Viaje ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas

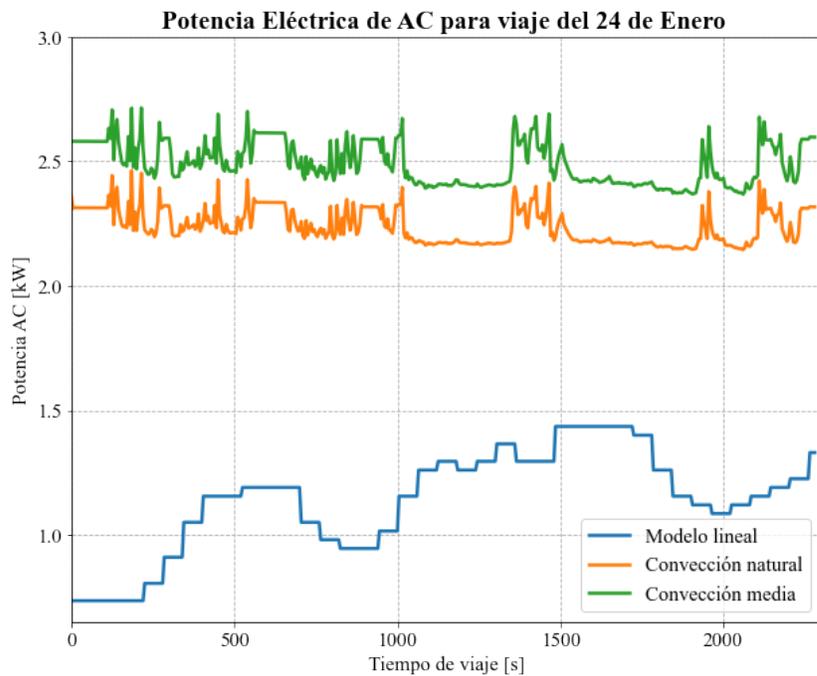


Figura 7.1.6: Potencia de aire acondicionado durante el tiempo para el viaje del 24 de febrero.

7.2. Variación de la potencia térmica de climatización a través del tiempo por cambios en la velocidad del vehículo

Para ver el efecto que genera en la carga térmica de AC los cambios de velocidad del vehículo en el tiempo del viaje, se utiliza una extensión de la librería de Matplotlib, LineCollection. Esta consiste en la representación del perfil de velocidad del vehículo en una gradiente de colores, que van desde la menor (púrpura) a la mayor velocidad (amarillo) registrada durante el viaje. Estas velocidades y los colores que toman son agregadas a la curva de potencia térmica en el tiempo, representando como esta aumenta o disminuye ante la variación de la velocidad. El código utilizado para realizar estos gráficos y los perfiles de velocidad se encuentran en los anexos D.1 y B, respectivamente.

Al igual que con los resultados anteriores, estos gráficos se dividen en horario de realización de cada viaje y tipo de convección dentro de la cabina.

7.2.1. Viajes con ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas

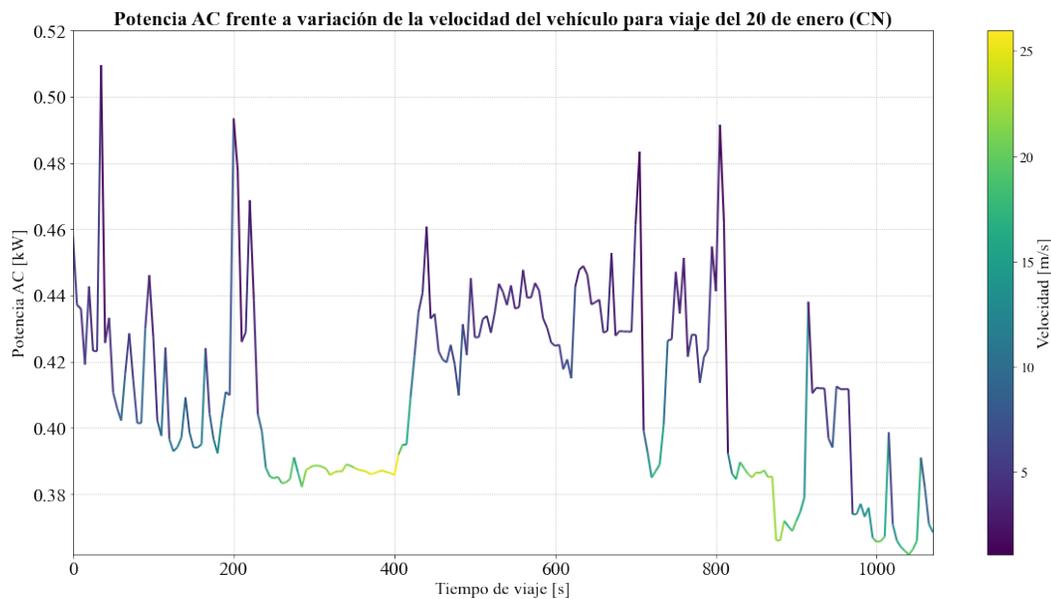


Figura 7.2.1: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 20 de enero con CN dentro de la cabina.

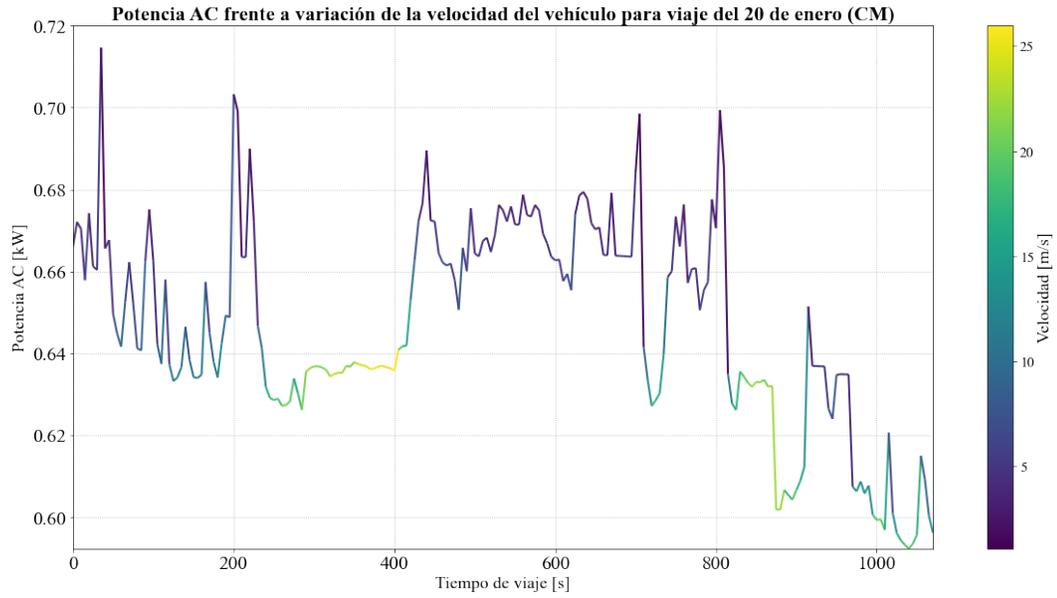


Figura 7.2.2: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 20 de enero con CM dentro de la cabina.

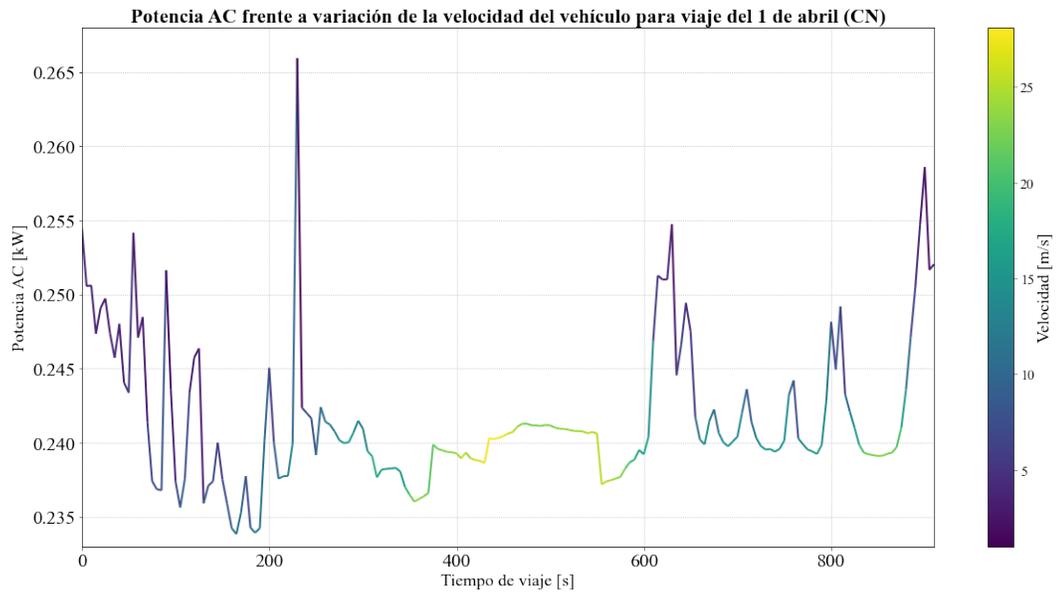


Figura 7.2.3: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 1 de abril con CN dentro de la cabina.

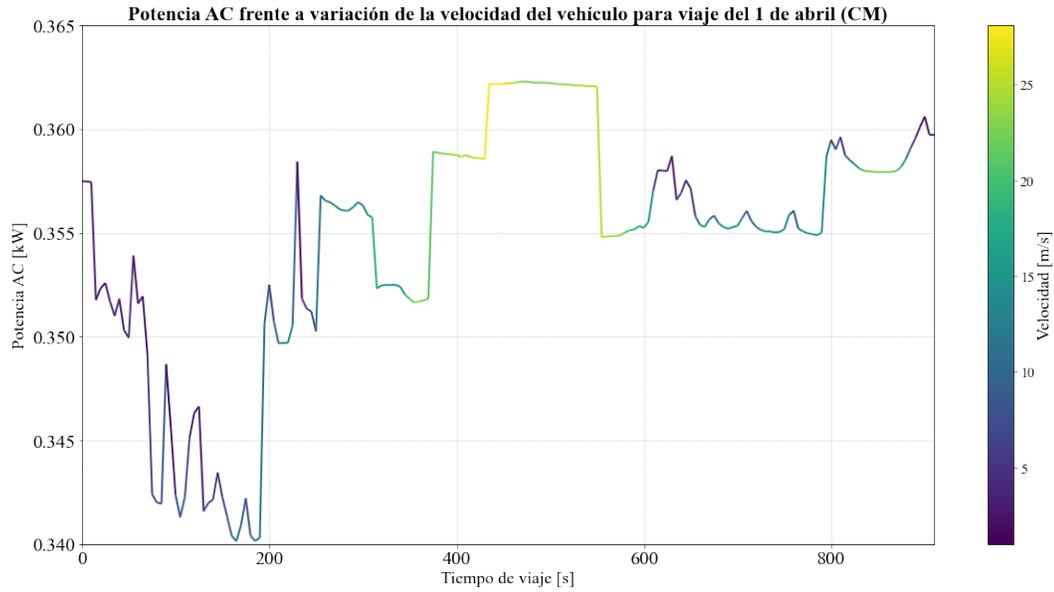


Figura 7.2.4: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 1 de abril con CN dentro de la cabina.

7.2.2. Viajes con ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas

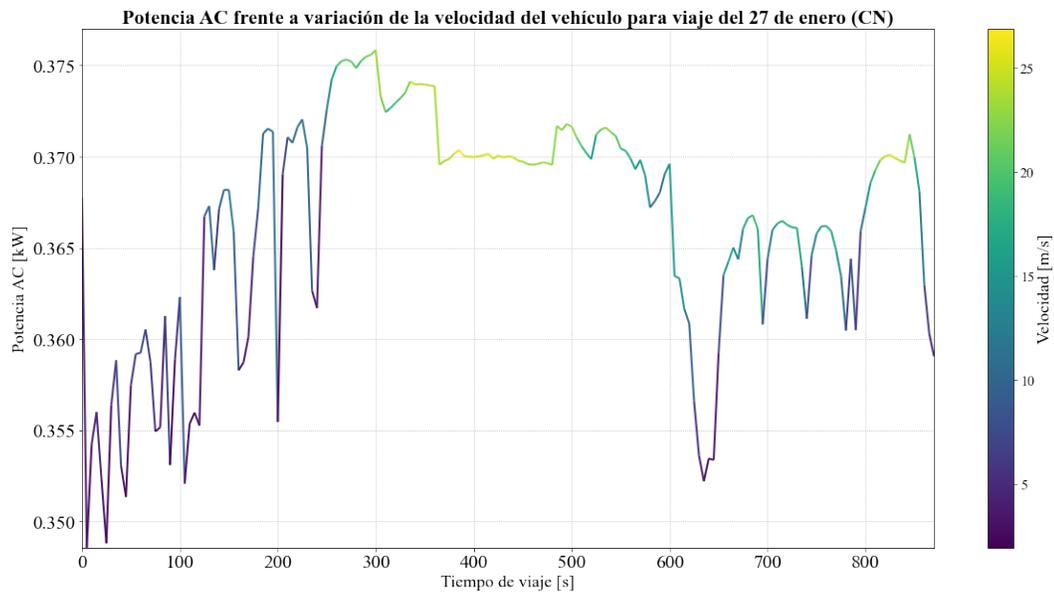


Figura 7.2.5: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 27 de enero con CN dentro de la cabina.

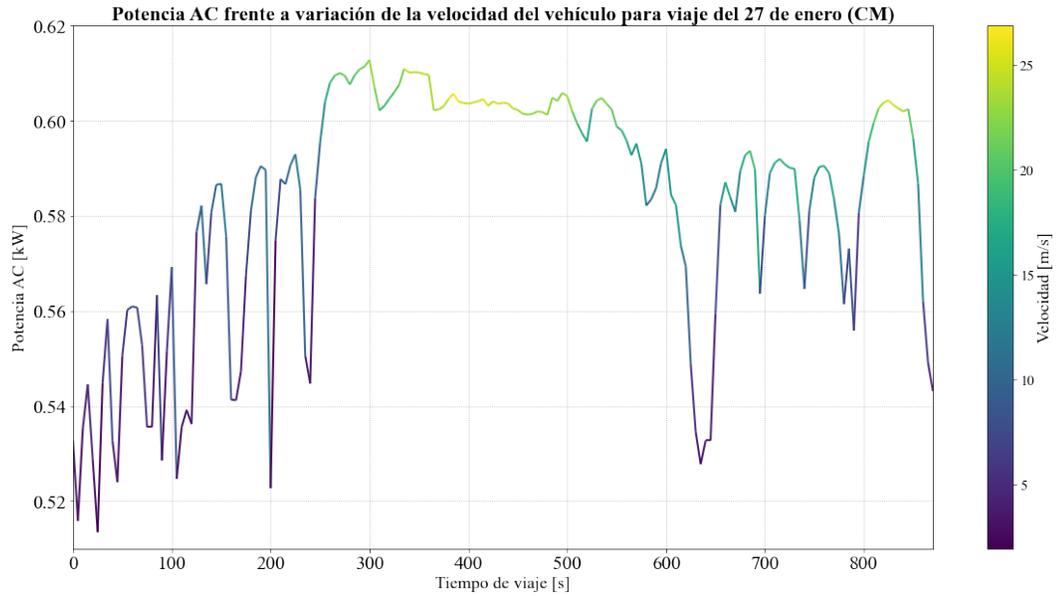


Figura 7.2.6: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 27 de enero con CM dentro de la cabina.

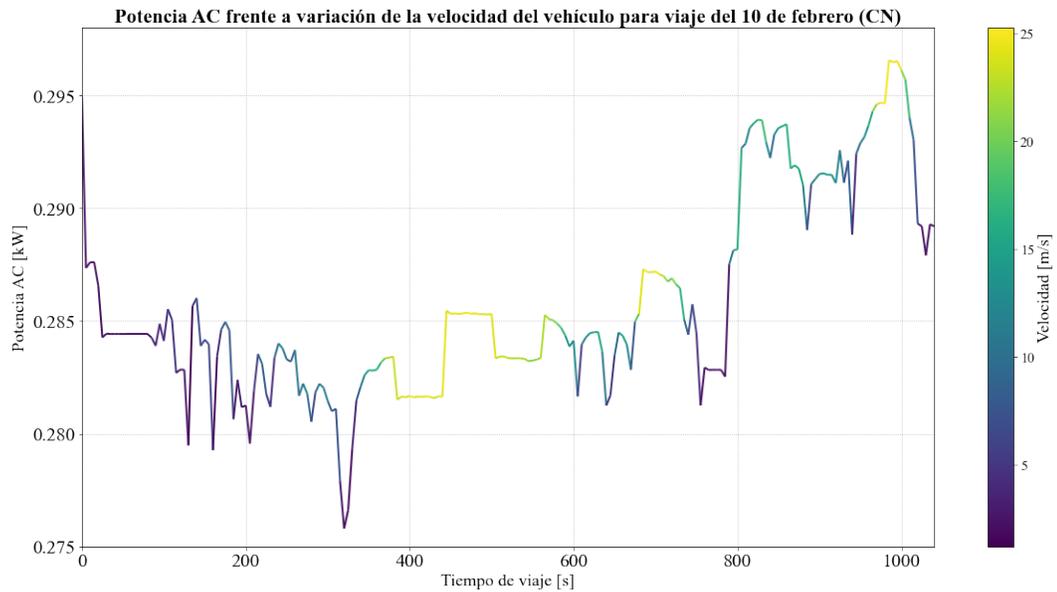


Figura 7.2.7: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 10 de febrero con CN dentro de la cabina.

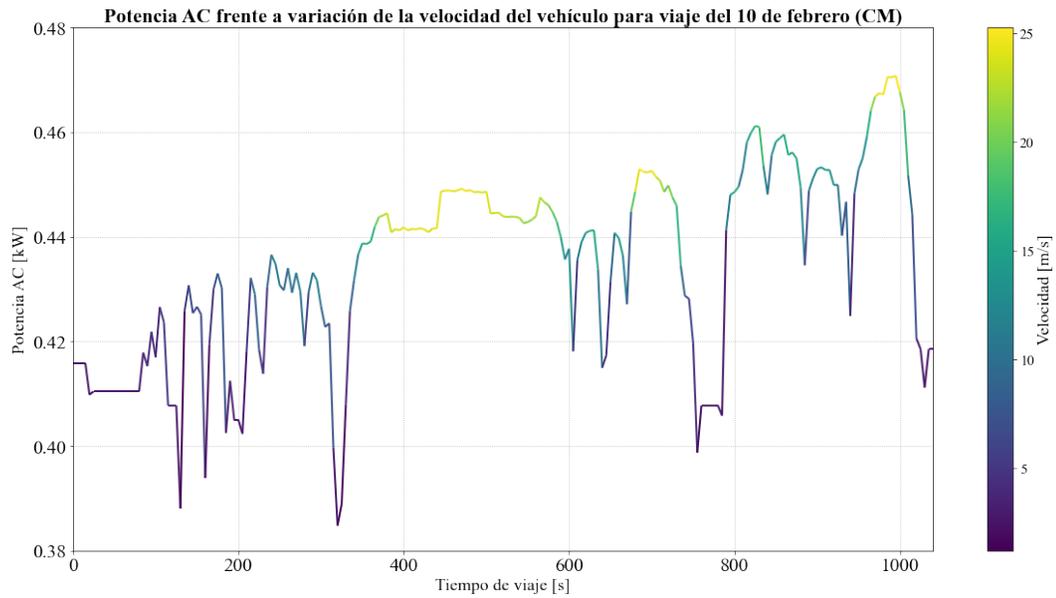


Figura 7.2.8: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 10 de febrero con CM dentro de la cabina.

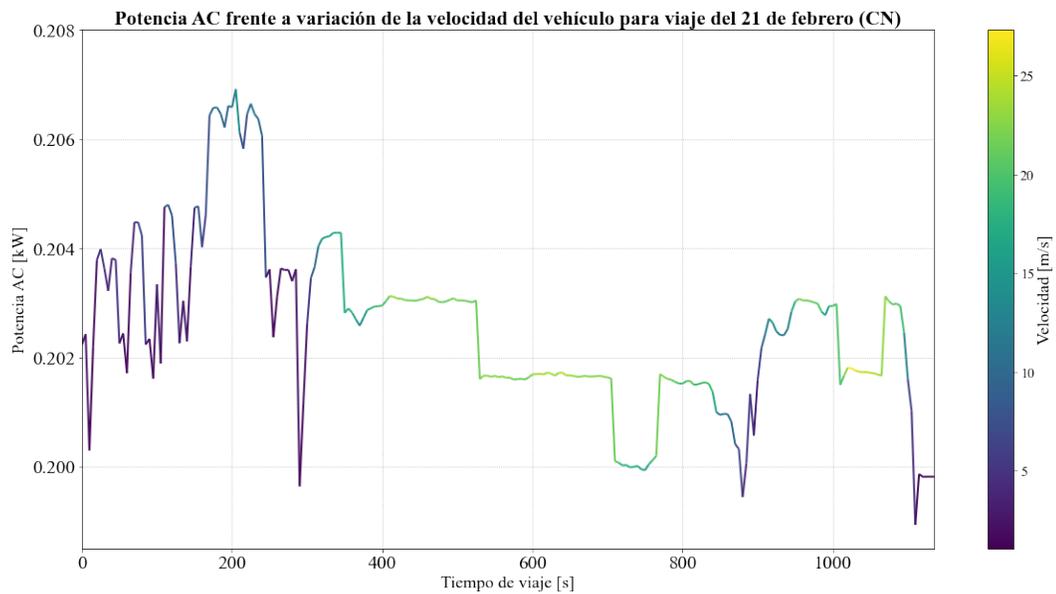


Figura 7.2.9: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 21 de febrero con CN dentro de la cabina.

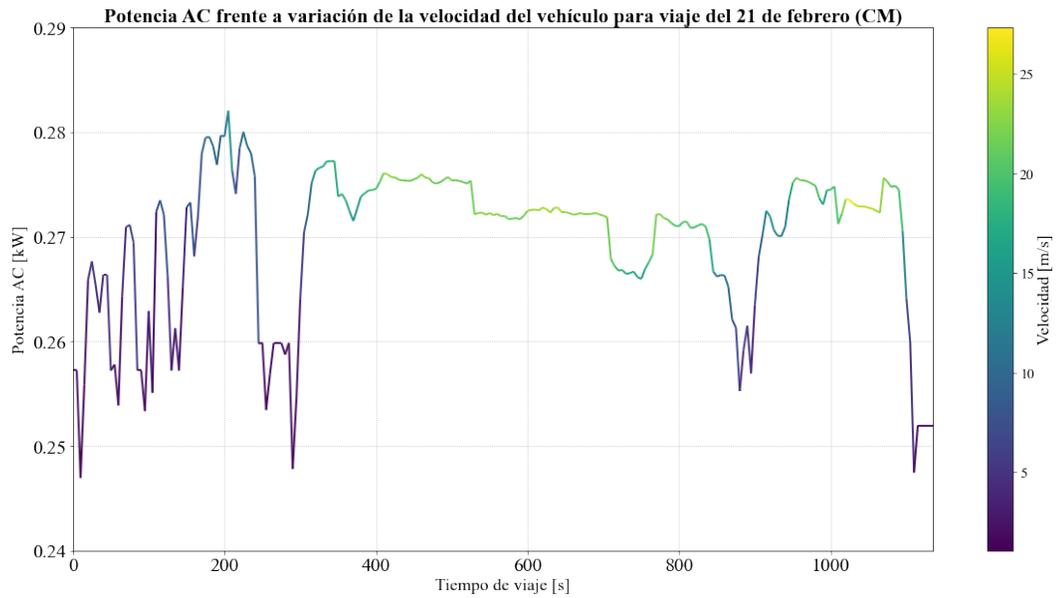


Figura 7.2.10: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 21 de febrero con CM dentro de la cabina.

7.2.3. Viajes con ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas

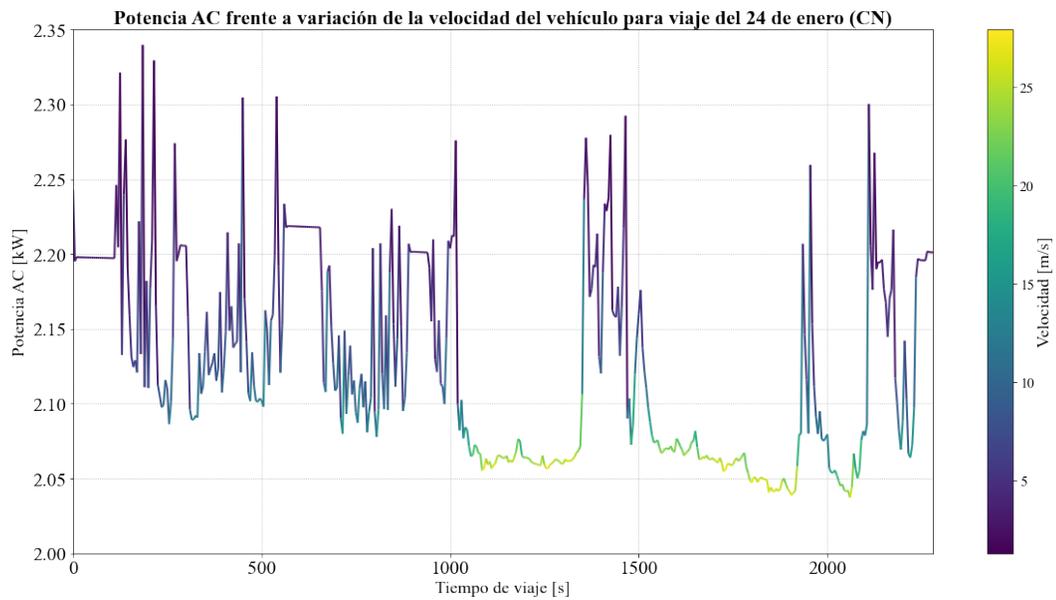


Figura 7.2.11: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 24 de enero con CN dentro de la cabina.

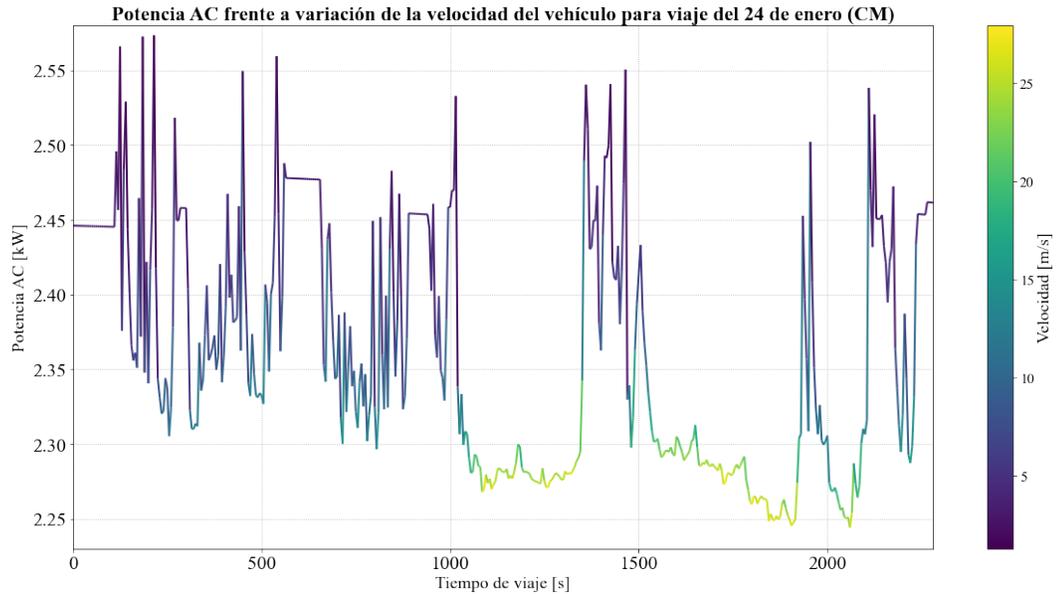


Figura 7.2.12: Cambios en la potencia térmica en el tiempo por variación de la velocidad instantánea, para viaje del 24 de enero con CM dentro de la cabina.

7.3. Consumo energético por parte del sistema de climatización para cada viaje

En las figuras que abarcan desde la 7.3.1 hasta la 7.3.3 se observan los consumos energéticos por parte del sistema de climatización del vehículo para cada viaje. Cada gráfico contiene el consumo calculando la potencia por instante de tiempo del modelo lineal y del modelo de cargas térmicas para ambas convecciones. Para esto se utilizan las ecuaciones 6.1 y 6.2. Como esto corresponde a la energía total que entrega la batería del vehículo para enfriar la cabina, en el caso del modelo de cargas térmicas, resulta necesario considerar la eficiencia de la batería de ion-litio.

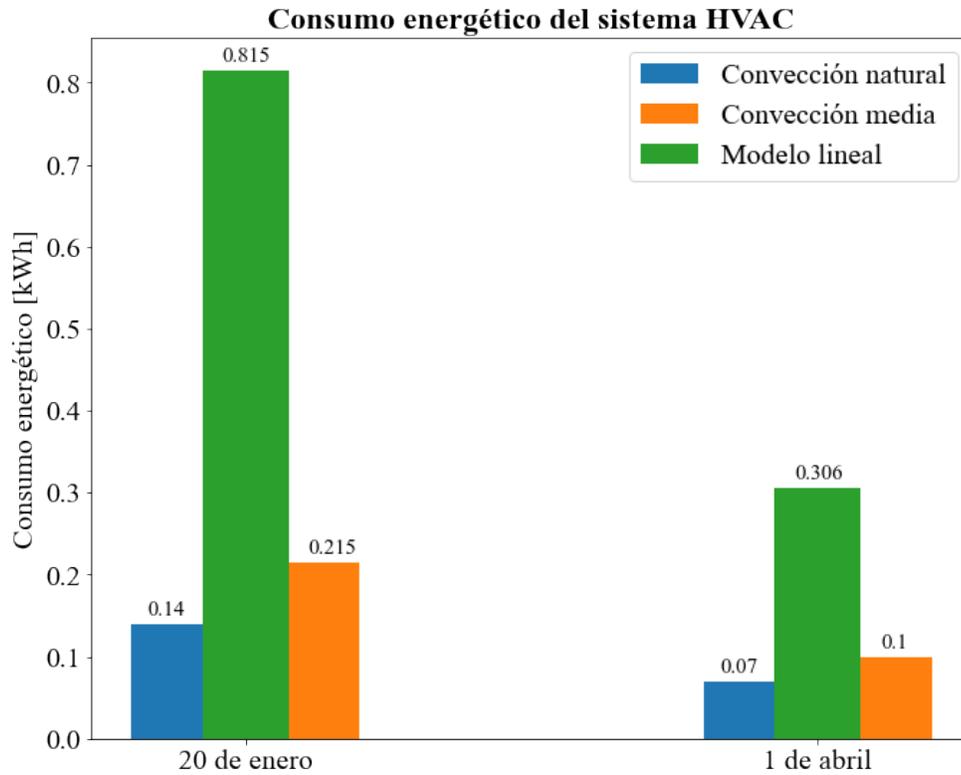


Figura 7.3.1: Consumo energético por el sistema de climatización para los viajes de ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas.

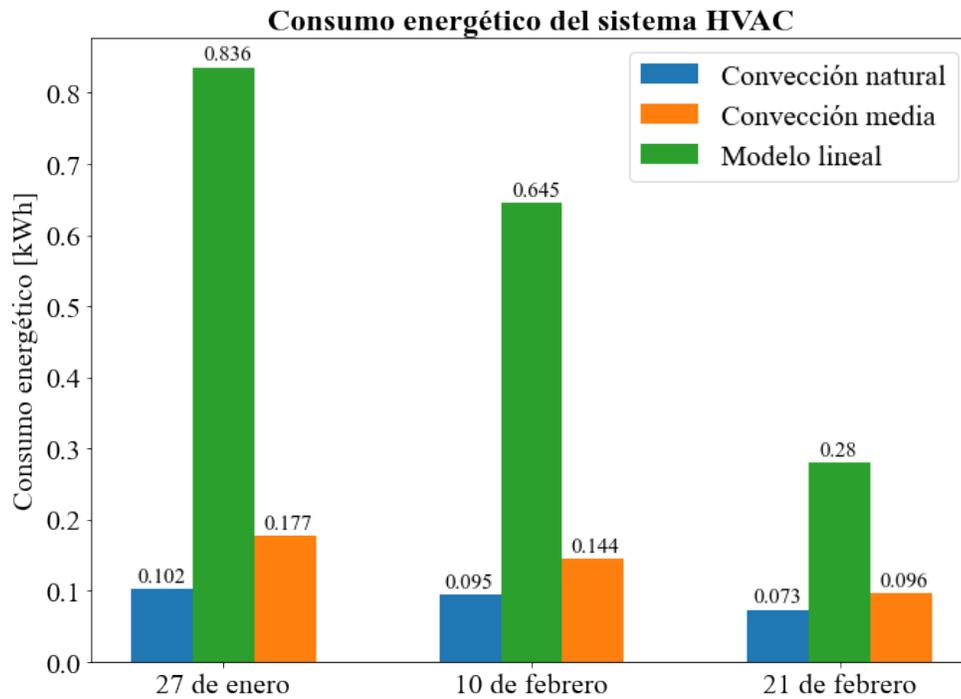


Figura 7.3.2: Consumo energético por el sistema de climatización para los viajes de ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas.

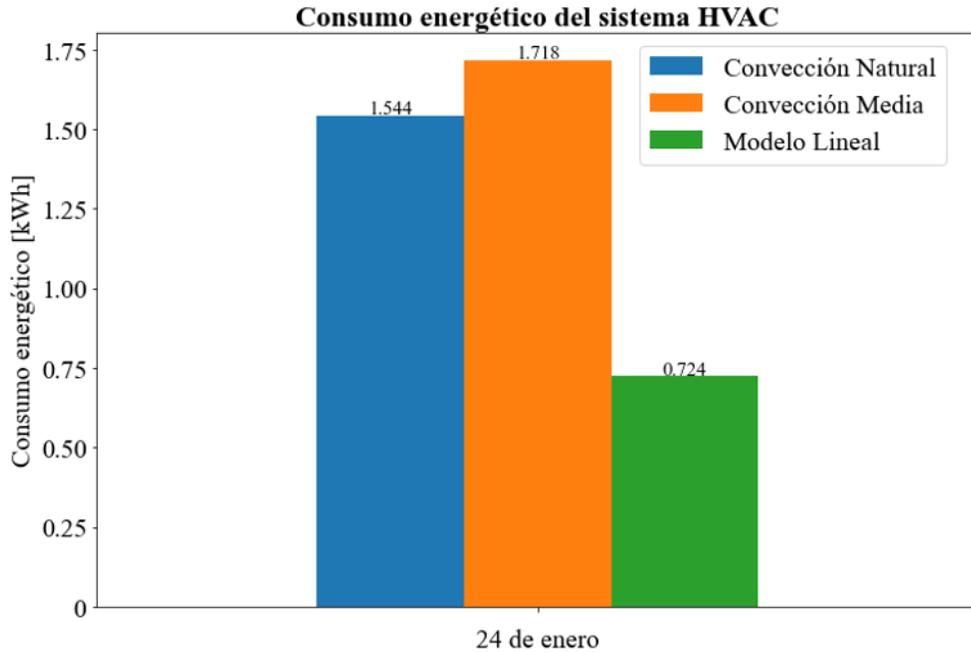


Figura 7.3.3: Consumo energético por el sistema de climatización para el viaje de ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas.

7.4. Consumo energético total por viaje

En esta sección, se presenta el consumo energético total por viaje, obtenido mediante la ecuación 6.3. Aquí se presenta el valor total y la subdivisión de esta en los dos sistemas relevantes: tracción y climatización. Los valores para el consumo de tracción son obtenidos mediante la resta entre el consumo energético total por viaje y el consumo energético por parte del sistema de climatización, considerando ambas convecciones. Los valores del consumo total (C_{total}) y los consumos por tracción ($C_{tracción}$) en cada caso, se observan en la tabla 7.4.1.

Tabla 7.4.1: Consumo energético total por viaje y consumo destinado a tracción.

Viaje	C_{total} [kWh]	$C_{tracción}$ (CN) [kWh]	$C_{tracción}$ (CM) [kWh]
20 de enero	1.12	0.98	0.9
1 de abril	1.12	1.05	1.02
27 de enero	1.12	1.02	0.94
10 de febrero	1.26	1.17	1.12
21 de febrero	1.68	1.61	1.58
24 de enero	2.8	1.26	1.08

En las figuras 7.4.1 y 7.4.2 se puede apreciar de forma gráfica, los valores del consumo total divididos en el consumo por tracción y por climatización.

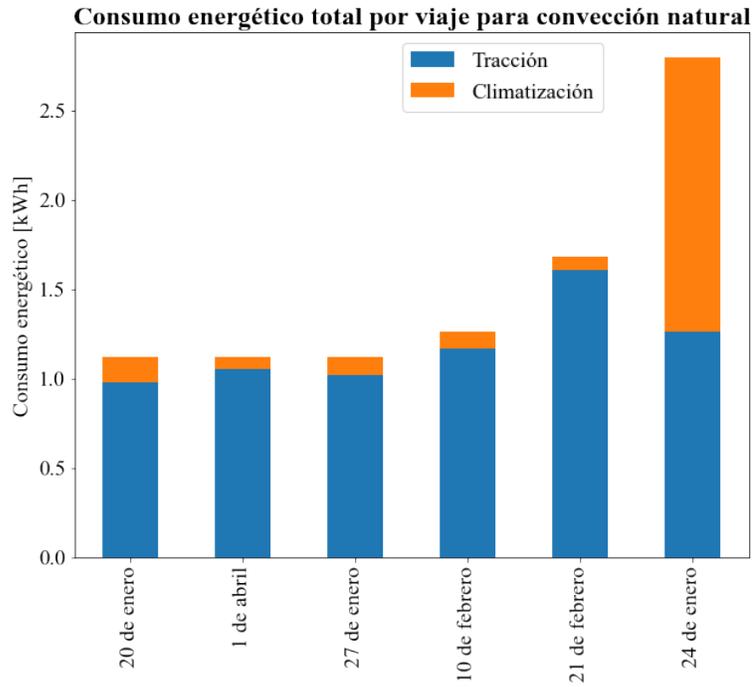


Figura 7.4.1: Consumo energético total por viaje, dividido en cada sistema relevante del vehículo, considerando convección natural dentro de la cabina.

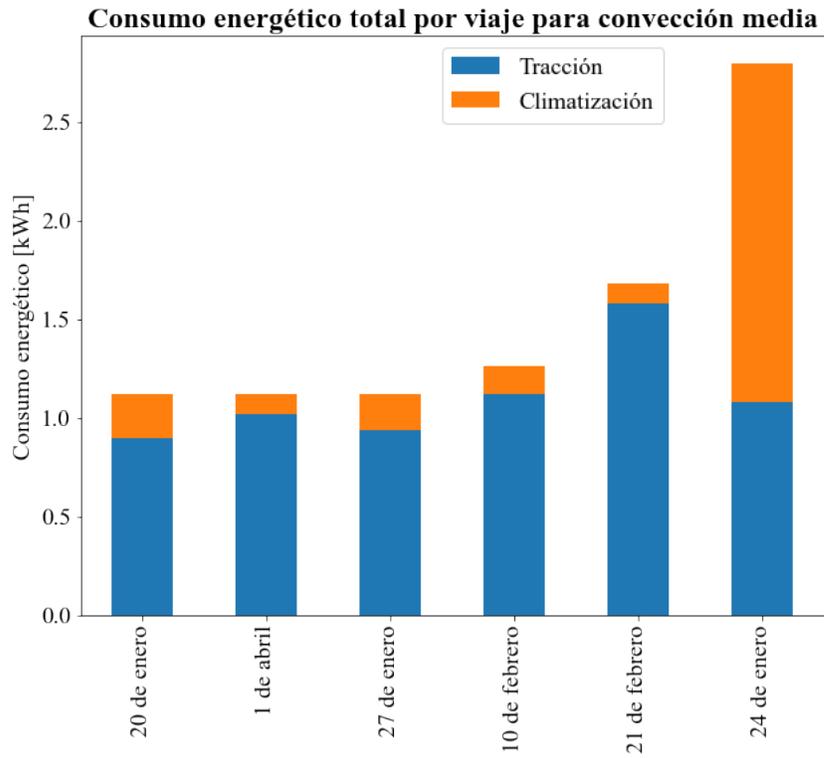


Figura 7.4.2: Consumo energético total por viaje, dividido en cada sistema relevante del vehículo, considerando convección media dentro de la cabina.

7.4.1. Consumo total utilizando ecuación de potencia de tracción

Otra forma de calcular el consumo total de energía viene dada por la suma entre el consumo energético por tracción obtenido desde la ecuación 6.4 y el consumo por climatización calculado desde el modelo de cargas térmicas. En la tabla 7.4.2, se observan los valores del consumo total para cada caso de convección dentro de la cabina.

Tabla 7.4.2: Consumo energético total y de tracción obtenido teóricamente.

Viaje	C_{trac} [kWh]	C_{tot} (CN) [kWh]	C_{tot} (CM) [kWh]
20 de enero	1.2	1.37	1.44
1 de abril	1.5	1.58	1.61
27 de enero	1.5	1.61	1.68
10 de febrero	1.5	1.61	1.65
21 de febrero	2.1	2.14	2.16
24 de enero	3.5	4.9	5.1

7.4.2. Porcentaje del consumo destinado a climatización

Mediante la ecuación 6.5 se obtiene el porcentaje de energía consumida desde la batería destinada a climatización. Para el caso del consumo calculado con la variación del SOC, en la tabla 7.3 se observan los porcentajes destinados para cada viaje considerando los dos tipos de convección dentro de la cabina.

Tabla 7.3: Porcentaje del consumo total (calculado con la variación del estado de carga) destinado a climatización.

Viaje	% E_{AC} (CN)	% E_{AC} (CM)
20 de enero	13	19
1 de abril	6	9
27 de enero	9	16
10 de febrero	8	11
21 de febrero	4	6
24 de enero	55	61

En el caso del consumo total utilizando el consumo por tracción sumado al de climatización por instante de tiempo (ecuaciones 2.3 y 6.4), el porcentaje destinado a este último, se observa en la tabla 7.4

Tabla 7.4: Porcentaje del consumo total (calculando el consumo por tracción) destinado a climatización.

Viaje	% E_{AC} (CN)	% E_{AC} (CM)
20 de enero	10	15
1 de abril	4	6
27 de enero	6	11
10 de febrero	6	9
21 de febrero	3	4
24 de enero	31	33

7.5. Métricas de eficiencia para el sistema de climatización

Una de las métricas de eficiencia del sistema de climatización durante el viaje consiste en calcular la energía que extrae el sistema desde la batería cada vez que el vehículo recorre un kilómetro. Otra, corresponde al consumo cada 100 kilometro recorridos. Esto ayuda a dimensionar que pasa con la eficiencia y autonomía cuando el vehículo eléctrico recorre grandes distancias. Para el cálculo de estas métricas, se utilizan las ecuaciones 6.6 y 6.7. Como parámetros de entrada para estas ecuaciones, se usan los consumos por climatización representados en las figuras 7.3.1, 7.3.2 y 7.3.3, además de las distancias totales que se observan en la tabla 3.2.4. Los resultados se visualizan en la tabla 7.5.1 para la métrica de consumo por kilómetro recorrido y en la 7.5.2 para la métrica de consumo cada 100 kilómetros.

Tabla 7.5.1: Consumo energético del sistema de climatización por kilometro recorrido del vehículo.

Viaje	$C_{e,km}$ [kWh/km] (CN)	$C_{e,km}$ [kWh/km] (CM)
Viajes con ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas		
20 de enero	0.013	0.020
1 de abril	0.005	0.008
Viajes con ruta similar realizados entre las 19:00 y 21:00 horas		
27 de enero	0.008	0.014
10 de febrero	0.007	0.011
21 de febrero	0.005	0.007
Viaje ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas		
24 de enero	0.057	0.063

Tabla 7.5.2: Consumo energético del sistema de climatización cada 100 kilómetros recorridos del vehículo.

Viaje	$C_{e,100km}$ [kWh] (CN)	$C_{e,100km}$ [kWh] (CM)
Viajes con ruta similar realizados entra las 17:00 y 18:00 horas		
20 de enero	1.280	2.011
1 de abril	0.538	0.769
Viajes con ruta similar realizados entra las 19:00 y 21:00 horas		
27 de enero	0.769	1.384
10 de febrero	0.696	1.082
21 de febrero	0.481	0.688
Viaje ruta larga realizado entre las 14:00 y 15:00 horas		
24 de enero	5.664	6.326

Capítulo 8

Análisis de resultados

Los resultados presentados en el capítulo 7 permiten generar una discusión sobre el efecto de la temperatura ambiente, las diferencias con el modelo lineal, el efecto de la velocidad del vehículo en la carga térmica de aire acondicionado y el consumo por climatización y el total por cada viaje. También, se pueden analizar las métricas de eficiencia del sistema de climatización en frente a diferentes condiciones meteorológicas.

8.1. Efecto de la temperatura ambiente en la potencia de climatización para cada viaje

Desde la figura 7.1.1 hasta la 7.1.6 se observan las curvas de potencia eléctrica de aire acondicionado en el tiempo. Se compara el modelo lineal con el modelo confeccionado en base a cargas térmicas. Dado que el modelo lineal depende únicamente de la temperatura ambiente, se deben considerar estas al momento de analizar, las cuales se observan en la tabla 3.2.3.

Para los viajes de ruta similar realizados entre las 17:00 y 18:00 horas, se observa una sobrestimación por parte del modelo lineal para los viajes del 20 de enero y 1 de abril, con ambas convecciones dentro de la cabina. En el caso del 20 de enero, la temperatura ambiente es de 31.8°C , mientras que para el viaje del 1 de abril, esta ronda los 27.8°C . Ambas temperaturas son mayores a la temperatura interna de la cabina, establecida en 24°C . Considerando además que estos viajes presentan una cantidad de radiación solar grande, (ver tabla 3.2.2), las superficies de la cabina toman temperaturas mayores a la externa y mediante los fenómenos de transferencia de calor que se dan entre el exterior y la cabina, el calor termina saliendo de las superficies, en vez de entrar (esto se comprende mejor al momento de evaluar el efecto de la velocidad del vehículo en las cargas térmicas). Como el modelo lineal no dimensiona correctamente el efecto de estos parámetros independientes de la temperatura ambiental, termina errando en la estimación de la potencia a través del tiempo y como resultado, en el consumo energético por climatización.

Este comportamiento se sigue observando en los viajes realizados entre las 19:00 y 21:00 horas. Acá entran los viajes del 27 de enero con una temperatura ambiente de 33.8°C , el del 10 de febrero con una temperatura ambiente de 30.4°C y por último el del 21 de febrero con 26.5°C . Pese a que la magnitud de las componentes de radiación que inciden en la superficie es casi nula, las temperaturas externas siguen siendo mayores que la interna, generando un aumento en la temperatura de las superficies debido al equilibrio térmico.

En el caso del viaje del 24 de enero, el cual se realiza entre las 14:00 y 15:00 horas, presenta una temperatura ambiente de 27.3°C . Este a su vez, por el horario donde se realiza, tiene una magnitud en la componente de radiación incidente considerablemente mayor a los otros viajes. Esto provoca que el modelo lineal no sea suficiente para estimar la potencia climatización necesaria, por no dimensionar el tamaño de la componente de radiación absorbida y transmitida en la carga interna de la cabina.

Analizando la potencia obtenida mediante el modelo de cargas térmicas, se observa que para los viajes entre las 17:00 y 18:00 horas, el viaje del 20 de enero alcanza en promedio, valores más grandes para ambas convecciones en la potencia de climatización a través del tiempo, comparando con el otro viaje realizado en el mismo horario. Esto se explica por la magnitud de la temperatura ambiente para este viaje en comparación al otro, tomando en consideración que la carga por radiación no debería influir demasiado por ser realizados en el mismo horario. En el caso de los viajes entre las 19:00 y 21:00 horas, el que alcanza peaks mayores para la potencia de climatización es el viaje del 27 de enero, el cual tiene la mayor temperatura ambiente de los tres. Este comportamiento se mantiene para los otros dos viajes, donde para el 10 de febrero con una temperatura ambiente mayor a la del 21 de ese mismo mes, se obtienen peaks de potencia climatización mayores.

En el caso del viaje de ruta larga, realizado entre las 14:00 y 15:00 horas, al no tener un símil de comparación, solo se puede analizar que los valores para la potencia de climatización que toma son mucho mayores a los viajes de ruta similar, pese a tener una temperatura ambiente promedio menor que la mayoría. Esto nuevamente viene explicado por la gran influencia que genera la carga térmica por radiación.

Por último, es importante observar que, para todos los casos, cuando el coeficiente convectivo aumenta, el valor alcanzado por la potencia de climatización también lo hace. Esto se explica por el fenómeno de convección. El aumentar el coeficiente provoca que la transferencia de calor desde las superficies hacia el interior incremente, generando un aumento en la carga convectiva interna y ,por consecuencia, en la carga de climatización necesaria para mantener la temperatura de confort térmico.

8.2. Efecto de la velocidad en la potencia térmica de aire acondicionado para cada viaje

Desde la figura 7.2.1 hasta la 7.2.12, se observa el efecto de la variación de velocidad, en los cambios de la carga térmica necesaria para mantener la temperatura de confort durante el tiempo de viaje.

Para los viajes realizados entre las 17:00 y 18:00 horas, con convección natural, se observa que los mayores peaks de potencia térmica en el tiempo presentan color púrpura. Esto indica que, cuando la velocidad del vehículo disminuye, aumenta la carga térmica de aire acondicionado. Los peaks más bajos toman colores de la gama verde-amarillo, que corresponde a las mayores velocidades registradas. Esto se debe, principalmente, a la ley de enfriamiento de Newton descrita en el capítulo 2. A medida que aumenta la velocidad, y con ello el coeficiente convectivo externo, aumenta la transferencia de calor entre la superficie y el fluido adyacente. Considerando los valores de temperatura ambiente para cada uno de los viajes, la carga recibida por radiación absorbida incrementa la temperatura de superficie, superando la temperatura ambiental en cada caso. Al aumentar la velocidad, el calor sale del medio de mayor temperatura (superficie) hacia el de menor (ambiente). Para el caso del viaje del 1 de abril, se cumple lo mismo.

Es importante destacar que este fenómeno no se cumple en todo instante de tiempo. Hay puntos donde la disminución de la velocidad instantánea genera una disminución en la carga. Esto se debe a que el modelo es cuasi-estacionario, por lo que estudia cada instante de tiempo por separado, provocando que la potencia en instantes de tiempo en particular, presente un comportamiento aislado del general.

En el caso de la convección media dentro de la cabina, para el viaje del 20 de enero, se mantiene el mismo comportamiento. Al aumentar la velocidad disminuye la carga térmica. Pero, en el viaje del 1 de abril, se observa que, en un tramo de tiempo, el aumento de velocidad implica un aumento en la potencia térmica. El incremento de la convección interna, al igual que en la externa, provoca un crecimiento en la transferencia de calor que se da entre dos superficies con temperaturas distintas. Esta correlación en ambas convecciones genera instantes donde el aumento del coeficiente convectivo interno de lugar a temperaturas de superficie menores a la ambiental, debido a la dependencia de todas estas variables entre sí. Esto hace que, al aumentar la velocidad del vehículo, ingrese calor a la cabina en vez de salir.

Para los viajes realizados entre las 19:00 y 21:00 horas donde existe una componente de radiación baja, se observa lo contrario. En el caso del viaje del 27 de enero se observa, en general, que los mayores peaks de potencia térmica se alcanzan a velocidades mayores. Un comportamiento similar se da con el viaje del 10 y 21 de febrero. Como se mencionó, la componente de radiación genera un impacto considerable en el aumento de la temperatura de

superficie. Al no existir esta componente, la temperatura de superficie toma valores menores o cercanos a la temperatura ambiental (entre 31°C y 33°C), principalmente por el efecto de la carga térmica por convección externa. Esto permite el ingreso de calor desde la superficie a la cabina con al aumentar la velocidad. En el caso de convección media, se mantiene un comportamiento similar.

Por último, para el viaje de ruta larga, se puede apreciar de mejor manera el efecto de la componente de radiación en el aumento de temperatura de superficie. Pese a que este trayecto presenta una temperatura ambiente menor en comparación a los viajes con ruta similar, el horario donde es realizado tiene una cantidad de radiación importante, haciendo que al aumentar la velocidad, siempre se tengan peaks de potencia bajos que se elevan al disminuir la velocidad del vehículo. Este efecto se ve reforzado nuevamente por el aumento de la convección interna, donde se mantiene el mismo comportamiento.

8.3. Consumo energético del sistema de climatización

8.3.1. Viajes con ruta similar

En las figuras 7.3.1 y 7.3.2 se observa el consumo energético total por parte del sistema de climatización para los viajes con ruta similar. Se analizan los consumos obtenidos para cada caso presentado en la gráfica.

8.3.1.1. Convección natural

En el caso de los viajes realizados entre las 17:00 y 18:00 horas, se observa que el del 20 de enero tiene el mayor consumo que el del 1 de abril. Al aumentar la temperatura en aproximadamente 5°C , existe un aumento en el consumo de energía de aproximadamente un 50 %.

Para los viajes realizados entre las 19:00 y 21:00 horas se observa un comportamiento particular. A medida que aumenta la temperatura también lo hace el consumo energético. Pero, existe un punto en la diferencia de temperaturas donde se estanca el aumento del consumo. El viaje del 27 de enero presenta un consumo energético de 1.02 kWh para convección natural, siendo el mayor de los tres viajes estudiados en este horario. Al compararlo con el viaje del 10 de febrero, el cual también tiene una temperatura sobre los 30°C , presentan una diferencia del 7% dentro del consumo energético por climatización, frente a un aumento de 3°C en la temperatura ambiente. Al comparar con el viaje del 21 de febrero, el cual tiene una temperatura inferior a 30°C , si existe un aumento de 7°C , como en el caso del viaje del 27 de enero, el aumento en el consumo energético es de aproximadamente 28% y en el caso del 10 de febrero, con un aumento menor, de 4°C , el consumo energético se eleva en un 22%. Estos dos aumentos son muy similares, pese a que el aumento de temperatura es mayor.

Por último, se comparan los incrementos entre viajes con temperaturas ambiente sobre los 30°C pero realizados en distintos horarios. Ante una diferencia de 2°C , lo cual se da entre el viaje del 20 y el 27 de enero, el aumento del consumo energético es de aproximadamente un 27%. Finalmente, comparando el caso del 10 de febrero y el 20 de enero con una diferencia de 1.4°C en la temperatura ambiente promedio, el consumo se eleva en un 32%. En ambos casos el viaje que tiene mayor consumo es el del 20 de enero, confirmando que además de la temperatura ambiente, el efecto de la radiación también genera un gran impacto.

8.3.1.2. Convección media

En el caso de los viajes realizados entre las 17:00 y 18:00 horas el incremento de temperatura genera un aumento similar al caso de la convección natural, con un 53%.

Para los viajes entre las 19:00 y 21:00 horas, frente a un aumento de 3°C , en temperaturas mayores a 30°C , el consumo energético es en un 19%, mayor que en la convección natural. Sin embargo, en diferencias de temperatura sobre y bajo los treinta, frente a un aumento de 7°C , el consumo incrementa en un 46% y frente a un aumento de 4°C crece en un 33%. Aquí, a medida que la temperatura aumenta, se observa un incremento similar en el consumo energético. Esto deja en claro, sumado a lo visto sobre los efectos de la velocidad en la carga térmica, que el estudio del coeficiente interno de la cabina es un factor importante.

Nuevamente se comparan los incrementos para viajes con temperaturas ambiente sobre los treinta grados, pero en distintos horarios. Con una diferencia de 2°C el incremento en el consumo es del 18% y frente al aumento de 1.4°C el consumo crece en un 33%.

8.3.1.3. Modelo lineal

Finalmente, en el caso del modelo lineal, para los viajes realizados entre las 17:00 y 18:00 horas, frente a un incremento de la temperatura ambiente, hay un aumento de un 62% en el consumo energético, mayor en comparación a los dos casos de convección interna definidos en el modelo de cargas térmicas.

Para los viajes realizados entre las 19:00 y 21:00 horas, el incremento para la variación de temperatura de 3°C entre temperaturas sobre 30°C es de un 23%, mientras que para el caso de temperaturas sobre y bajo los 30°C , existe un incremento de un 57% en el consumo frente a un aumento de 4°C y de un 67% frente a un incremento de 7°C . En todos los casos, el aumento en el consumo, son mayores comparando los dos casos de convección en el modelo de cargas térmicas.

8.3.1.4. Diferencia entre consumos para cada viaje por tipo de convección

En la tabla 8.3.1 se observan los incrementos en consumo energético para por viaje viaje al cambiar desde convección natural a media en la cabina.

Tabla 8.3.1: Aumento en el consumo energético por climatización al cambiar el tipo de convección dentro de la cabina.

Viaje	Aumento en el consumo por climatizacion
20 de enero	35 %
1 de abril	30 %
27 de enero	42 %
10 de febrero	34 %
21 de febrero	24 %

8.3.2. Viaje de ruta larga

Respecto al viaje de ruta larga, este presenta el mayor consumo energético por climatización en comparación a todos los viajes estudiados en este trabajo. Esto no se puede explicar directamente por una mayor temperatura ambiente en comparación a los viajes de ruta similar, debido a que esta es, en la mayoría de los casos, menor. Su explicación esta asociada a una mayor duración y exposición a la radiación solar que este tiene. Respecto a los tres casos, acá, a diferencia de los otros viajes, el modelo lineal arroja el menor consumo. Entre los casos para el modelo de cargas térmicas, existe una diferencia de aproximadamente un 10 % entre los consumos energéticos para cada convección de la cabina.

8.4. Consumo energético total por viaje

En las figuras 7.4.1 y 7.4.2 se observa el consumo energético total para cada viaje, calculado con el porcentaje de variación del SOC del vehículo. Este consumo, además de indicar cuanto gastó cada viaje en comparación al total, es también una forma rápida de verificar que el modelo de cargas térmicas estima de buena manera el consumo por climatización. Este consumo se divide en los dos subsistemas más relevantes, el consumo por tracción y el de climatización. Debido a que este último es un consumo auxiliar, la energía para mover el vehículo siempre tomara un mayor porcentaje en el total. Para los dos tipos de convecciones dentro de la cabina, el consumo total presenta un comportamiento similar, variando en la magnitud de este.

Para los viajes con ruta similar, el viaje que más energía consume desde la batería es el del 21 de febrero, lo cual se explica por la distancia total que recorre, la cual es mayor en promedio tres kilómetros respecto a los otros.

De todos los viajes estudiados, el que presenta un mayor consumo es el viaje del 24 de enero, ya que recorre una distancia mucho mayor en comparación a los de ruta similar y tiene el consumo por climatización más alto.

Sin embargo, en ambas gráficas, se puede observar que el consumo para mantener el confort térmico es igual o mayor al consumo por mover el vehículo, lo cual es una estimación errónea de la distribución del total. Esto depende de la variación del estado de carga el que, como se explicó en otros capítulos, depende del SOC inicial y final. Esta variación poco representativa se puede explicar, primero, por una medición errónea de los datos del estado de carga de la batería debido a un problema en el sistema de gestión. Otra explicación puede ser el efecto del freno regenerativo. Este aprovecha la energía de cada desaceleración o frenada para convertirla en electricidad, la que es enviada para recargar la batería y así aumentar o mantener la autonomía. Esto podría generar que el estado de carga de la batería aumentara y no pudiera verse reflejado el consumo efectivo del viaje en esta. Como en carreteras o autopistas el efecto del freno regenerativo es menor, genera que los cálculos para los viajes de ruta similar se asemejen más a la realidad, debido a la trayectoria que siguen.

Es por lo anterior, que se calcula el consumo por tracción teórico y se suma al consumo de climatización obtenido para ver el consumo total. Estos valores se pueden observar en la tabla 7.4.2. Para los viajes de ruta similar, el valor total alcanzado es similar al observado en las figuras 7.4.1 y 7.4.2. Esto se ve representado de forma más clara comparando las tablas 7.4 y 7.3. Para los viajes de ruta similar, el porcentaje destinado a climatización, varía muy poco, siendo levemente mayor en el caso del consumo total calculado con la variación del SOC. La mayor diferencia se observa en el viaje de ruta larga, donde el consumo destinado a climatización se reduce a, aproximadamente, la mitad en comparación al otro modelo, entregando un referente de cuanto se gastaría por climatización, en un viaje bajo condiciones que requieren un consumo energético mayor para mantener el confort térmico dentro de la cabina.

8.4.1. Porcentaje destinado a HVAC

Respecto al porcentaje de energía destinado a la climatización de la cabina, se observa que, para ambos métodos del cálculo del consumo total, en los viajes de ruta similar estos presentan valores muy similares, lo que se puede explicar por el bajo efecto que tiene el freno regenerativo en viajes que gran parte de su tramo corresponde a autopistas, lo que permite obtener información más fidedigna respecto al consumo total por viaje, utilizando la variación del SOC. También se puede ver que un aumento en la convección interna genera también a su vez un incremento en el porcentaje de la energía destinada a climatización. Respecto al

viaje de ruta larga, se observa un aumento de aproximadamente el doble en el porcentaje de consumo calculado con ambos métodos, siendo el estimado con la ecuación de tracción, el que más se asemeja a la realidad. Este viaje presenta el mayor porcentaje destinado a climatización de todos los estudiados, debido a la mayor exposición de carga externa a la que se encuentra expuesto, lo que hace que tenga mayores requerimientos energéticos para mantener el confort térmico.

Entre los viajes de ruta similar, el que mayor porcentaje destina a climatización es el del 20 de enero. este porcentaje disminuye, en más o menos, la mitad al comparar con el viaje del 1 de abril con aproximadamente 5°C de temperatura. Entre los viajes realizados en horarios nocturnos este porcentaje disminuye a medida que la temperatura ambiente también lo hace.

8.5. Métricas de eficiencia para el sistema de aire acondicionado

En la tabla 7.5.2 se observa el consumo energético de climatización por kilómetro recorrido para cada viaje, con ambas convecciones. Esta métrica indica que el viaje de ruta similar con mayor eficiencia, en ambos casos, es el del 21 de febrero, seguido del viaje del 1 de abril, ambos con temperaturas ambientes de menor magnitud dentro de los viajes de ruta similar. Entre el total estudiado, el que presenta menor eficiencia corresponde al del 20 de enero en ambos casos. Esto se explica por tener la menor distancia recorrida de todas, pero un mayor consumo para mantener el confort térmico de la cabina.

En el caso del 24 de enero, pese a que este solo recorre una distancia de aproximadamente el doble que los otros viajes, su consumo por climatización es de aproximadamente 10 veces el consumo del viaje con mayor requerimiento de los viajes con ruta similar.

Analizando las diferencias porcentuales de eficiencia en relación con los cambios de temperatura ambiente para los viajes más y menos eficientes, en la categoría de ruta similar, entre el viaje del 21 de febrero y 20 de enero con una diferencia de 5°C , existe una disminución de la eficiencia de aproximadamente un 64 %. Comparando los viajes con mayor y menor eficiencia dentro de horarios con carga de radiación similar, entre el viaje del 20 de enero y 1 de abril, con una diferencia de 4°C , la eficiencia disminuye en un 61 % y entre el viaje del 27 de enero y del 21 de febrero, frente a una diferencia de 7°C , la eficiencia disminuye en promedio un 45 %.

Comparando en todo el rango de viajes estudiados, el viaje menos eficiente es el 24 de enero y contrastando con el viaje más eficiente que corresponde al 21 de febrero, frente a una diferencia de aproximadamente 1°C , la eficiencia disminuye en promedio un 90 %.

Ahora, observando la tabla 7.5.2, la métrica indica que viaje es más eficiente cada 100 km recorridos por el vehículo. En este caso, la eficiencia según esta métrica se comporta de manera similar que para el caso anterior. El viaje más eficiente es el del 21 de febrero, que en comparación a la métrica anterior, el consumo se eleva a, aproximadamente, 96 veces el consumo que se requiere para conducir un kilómetro. El viaje menos eficiente es el del 20 de enero. Aquí el consumo es de, aproximadamente, 98 veces el consumo según la métrica anterior.

En el caso del viaje de ruta larga, este es el menos eficiente de todos los viajes estudiados, con un consumo de aproximadamente 99 veces el consumo cada vez que recorre un kilómetro. En comparación al viaje de ruta similar con menor eficiencia, a diferencia de la otra métrica, el consumo es menor, aproximadamente 4 veces mayor.

Nuevamente, se analizan las diferencias porcentuales de eficiencia. Comparando los viajes dentro de la categoría de ruta similar, entre el viaje del 21 de febrero y 20 de enero la eficiencia disminuye aproximadamente un 64 %. Comparando los viajes realizados en horarios con radiación similar, entre el viaje del 20 de enero y 1 de abril, la eficiencia disminuye en un 58 % y entre el viaje del 27 de enero y del 21 de febrero, en un 44 %. Analizando todo el espectro de viajes estudiados, entre el viaje del 24 de enero y el 21 de febrero, para esta métrica, la eficiencia disminuye en un 90 %.

Capítulo 9

Conclusiones

Se comienza concluyendo que los objetivos, tanto general como específicos de este trabajo, se cumplieron. Se logro estimar el impacto de las dos variables de estudio, temperatura ambiente y velocidad del vehículo, tanto en la carga térmica y el consumo energético durante el viaje, para mantener el confort térmico dentro de la cabina.

Lo anterior se logró mediante el cumplimiento de otros objetivos, como la confección de un modelo de cargas térmicas que permitiera estimar un consumo energético por climatización para cada viaje. Además, se pudo obtener viajes que entregan información necesaria para poder aplicar este modelo considerando cada instante de tiempo del viaje y así estimar, por ejemplo, el impacto de la velocidad del vehículo. Se logra una mayor certeza incluyendo datos como las dimensiones de la cabina mediante la elaboración de un polígono que respeta las dimensiones originales del modelo Hyundai Ioniq 2019 BEV y considera superficies donde existe un intercambio de calor considerable respecto a otras. Además, gracias a los datos disponibles sobre radiación y los modelos teóricos, se pudo elaborar un modelo simple para la estimación del ángulo de incidencia de radiación solar y entregarle mayor precisión al modelo. También, se pudo encontrar datos de temperatura ambiente específica por minuto para la fecha y hora de cada viaje. Por último, los datos faltantes para ser usados como parámetros de entrada del modelo, como los termodinámicos y las características de los materiales de la cabina, se obtuvieron de fuentes teóricas y experimentales. Todo lo anterior en su conjunto, permite tener un modelo de cargas térmicas más certero, que logró estimar el impacto de las dos variables de estudio.

Con lo mencionado anteriormente, se concluye que el modelo de potencia lineal sobrestima para los viajes de ruta similar y subestima en el de ruta larga, el consumo energético total por climatización. Como se desprendió del análisis, esto se explica porque el modelo solo considera que la temperatura ambiente influye en el consumo, ignorando parámetros relevantes en la salida o entrada de calor a la cabina, como lo es la radiación solar en el aumento de la temperatura de superficie y la variación de la velocidad del vehículo en el aumento o disminución de la convección externa.

Respecto al efecto de la velocidad del vehículo en la carga térmica por climatización, se concluye que su efecto es relevante y este se puede observar de mejor manera en los viajes separados por rango horario, ya que permite visualizar como los cambios en el coeficiente convectivo externo, dependiendo de la temperatura que tenga la superficie permitirá, por ejemplo, en el caso de los viajes realizados en horarios con radiación solar, salida de calor desde las superficies hacia el ambiente. Esto evita que el calor entre a la cabina y la carga por climatización disminuye a medida que aumenta la velocidad. En el caso de los viajes sin componente de radiación, las temperaturas de superficie son menores, permitiendo que entre calor a la cabina y aumentando la carga de aire acondicionado necesaria para mantener el estado de confort.

En relación con el efecto de la temperatura ambiente en el consumo energético por climatización, los viajes deben ser separados en rangos horarios debido al impacto de la carga térmica por radiación en el equilibrio térmico total de la cabina. Al respecto, se puede concluir que para los viajes de ruta similar, entre las 17:00 y 18:00 horas, un incremento de 5°C provoca un aumento 50 % en el consumo total por climatización. Para los viajes realizados entre las 19:00 y 21:00 se observa que ante un aumento en la temperatura ambiente el consumo también crece, pero no en la misma proporción que en los viajes realizados más temprano. Se puede concluir que este comportamiento depende del rango de temperaturas que tiene cada viaje, cuyos valores se mueven sobre y bajo los 30°C . Viajes con temperaturas mayores a los 30°C presentan un aumento de aproximadamente un 7 % en el consumo por climatización frente a un aumento de 3° . Al aumentar esta diferencia, los consumos se elevan aproximadamente cuatro veces el valor anterior, pero en los viajes estudiados frente a un aumento en la temperatura que van desde los 4°C a los 7°C , el aumento del consumo se estanca en promedio un 28 %. Además, se concluye que, para verificar este comportamiento, sería ideal extrapolar este modelo a más viajes con ruta similar y así poder cuantificar si se mantiene esta tendencia.

El efecto del coeficiente convectivo es importante, con un aumento que alcanza aproximadamente un 42 % al cambiar de convección natural a media. Esto permite concluir que el impacto de este parámetro, al igual que en el caso de la carga térmica por radiación, es relevante.

Respecto al porcentaje del consumo destinado a climatización, se concluye que el cálculo del consumo total utilizando la variación del SOC en el viaje, no permite dimensionar el consumo destinado a climatización debido a que gran parte de la ruta realizada por este viaje ocurre dentro de la ciudad, pudiéndose observar el efecto del freno regenerativo y obteniendo valores para el SOC final del viaje que corresponde a la energía total de la batería al finalizar el viaje. Lo anterior, no estima el consumo neto del viaje, pese a que gran parte de la energía utilizada se recupera. Por ello siempre es bueno para este tipo de análisis utilizar modelos que puedan estimar la energía utilizada en tracción por separado y así poder estudiar el consumo

efectivo destinado a climatización.

En todos los viajes de ruta similar, se observa que el porcentaje destinado a climatización se mueve entre el 3% y el 20% considerando los dos métodos de cálculo y los dos tipos de convección dentro de la cabina. Se puede concluir que a medida que la temperatura ambiente aumenta, lo hace también el porcentaje destinado a mantener el confort térmica. De igual forma se puede concluir que a medida que aumentan los requerimientos térmicos del viaje, debido a todos los factores climáticos, aumenta también el porcentaje de climatización, lo cual se ve reflejado en los viajes del 20 y 24 de enero.

Respecto a la eficiencia del sistema de climatización para cada viaje, para ambas métricas se puede concluir que, para el mismo rango horario, a medida que disminuye la temperatura ambiente, aumenta la eficiencia del sistema de aire acondicionado, incluso para rutas que abarcan una mayor distancia. Para viajes con ruta similar, el 20 de enero presenta la menor eficiencia por el mayor consumo que necesita para mantener el confort térmico y la menor distancia que recorre, a diferencia del viaje del 21 de febrero, donde ocurre todo lo contrario y termina presentando la mejor eficiencia del sistema de aire acondicionado. De todos los viajes analizados, el que menor eficiencia presenta es el viaje del 24 de enero.

Finalmente, se puede concluir que los viajes estudiados permiten obtener una visión general de los consumos destinados a climatización para viajes con distintas características realizados dentro de Santiago de Chile, pudiendo así obtener información de cuanto consumiría un viaje, bajo las mismas condiciones climáticas, al recorrer distancias y/o rutas similares.

9.1. Trabajo a futuro

9.2. Mejoras al modelo

Una de las mejoras a este modelo que puede ser implementada es la elección de una temperatura de confort que se adecue a los ocupantes de la cabina, según las necesidades biológicas de cada uno. Esto es importante, ya que desarrollar un sistema de control que logre ajustar este parámetro respecto al género, peso, altura de los pasajeros, etc, puede ayudar a gestionar de mejor manera el sistema de climatización del vehículo y así incrementar la autonomía. Uno de los estudios que se han enfocado en desarrollar esta variable es el planteado por Xie (2020) [16], donde se establece un modelo que estima la temperatura de confort en base a parámetros como la tasa metabólica, la resistencia térmica de la ropa, temperatura del aire y radiante media, velocidad del viento, humedad relativa, entre otras.

Otra mejora a considerar es la realización de un ajuste a las constantes del modelo lineal ya que al no considerar factores importantes como lo son la velocidad del vehículo, la cantidad de radiación presente y la convección interna de la cabina, el modelo se queda corto al

solo depender de la temperatura ambiente. Esto permitiría estimar consumos aproximados por climatización de forma mucho más rápida, debido a la simplicidad del modelo, en cuanto a que no entra en detalles como lo hace el modelo de cargas térmicas que a la larga resulta más lento.

Respecto al impacto de la radiación, sería importante realizar estudios que busquen dimensionar su efecto en la carga térmica total para climatizar la cabina. Un modelo que estime el ángulo de incidencia de la radiación solar considerando cada cambio en la longitud y latitud del viaje, resultaría útil con el fin de cuantificar el impacto real, ya que el modelo diseñado en este trabajo consideraba rutas que se aproximaban en dirección sur-norte. Como acciones directas para disminuir el efecto de la radiación solar en las superficies de la cabina, puede ser el estudio en detalle de los distintos materiales utilizados en las superficies. Un ejemplo de esto es el realizado por Favoino (2020) [40] donde se investiga el impacto del diseño y las características de las superficies transparentes con relación al consumo de HVAC y como esta afecta al rendimiento y autonomía de conducción de un VE.

Por último, extrapolar este modelo a otros viajes con diferentes rutas, a otro modelo de vehículo eléctrico o incluso a otras ciudades dentro de Chile, similar al estudio realizado por Zhang (2017) [15], permitiría ampliar el estudio realizado en este trabajo y obtener más información de como se ve afectado el consumo frente a las mismas variables analizadas en este trabajo frente a diferentes escenarios.

Bibliografía

- [1] Biblioteca del congreso nacional de Chile (BCN) “Electromovilidad: Tendencias y experiencia nacional e internacional,” Asesoría Técnica Parlamentaria, 2019.
- [2] Agencia de sostenibilidad energética, “Cinco pasos para la electromovilidad,” Guía nro 1. Santiago, Chile, 2020.
- [3] Lee J. T., Kwon S., Lim Y., Chon M. S., y Kim, D., “Effect of air-conditioning on driving range of electric vehicle for various driving modes,” SAE Technical Paper, No. 2013-01-0040, 2013.
- [4] Shimin V. V., Shah V. A. y Lokhande M. M., “Electric vehicle batteries: A selection based on PROMETHEE method,” IEE 7th Power India International Conference (PIICON), pp. 1-6, 2016.
- [5] Nour M., Chaves-Ávila J. P., Magdy G. y Sanchez-Miralles A., “Review of positive and negative impacts of electric vehicles charging on electric power systems,” Energies, 13(18), 4675, 2020.
- [6] Victron Energy BLUE POWER, Ficha técnica Baterías de litio SuperPack de 12,8 V. Almere, Países Bajos.
- [7] Mebarki B., Draoui B., Allaou B., Rahmani L. y Benachour E., “Impact of the air conditioning system on the power consumption of an electric vehicle powered by lithium-ion battery,” Modelling and Simulation in Engineering, 2013.
- [8] Zhang M. y Fan X., “Review on the state of charge estimation methods for electric vehicle battery,” World Electric Vehicle Journal, 11(1), 23, 2020.
- [9] Hyundai Motor Company, Ficha Técnica Hyundai Ioniq [en línea] <<https://hyundai.cl/content/uploads/ficha-tecnica-ioniq-21.5x28-cm.-1-1.pdf>> [consulta: 20 de mayo 2022]
- [10] Hyundai Motor Company, Conduciendo Innovación: Ioniq Hybrid and Electric [en línea] <<https://hyundai.cl/content/uploads/ioniq-electrico-2.pdf>> [consulta: 20 de mayo 2022]
- [11] CNN Chile, Aeropuerto incorpora flota de taxis 100 % eléctricos: Transvip apuesta por la tecnología amable con el medio ambiente [en línea] <https://www.cnnchile.com/pais/aeropuerto-incorpora-flota-de-taxis-100-electricos-transvip-se-renovo-con-tecnologia-amable-con-el-medio-ambiente_20181026/> [consulta: 3 de junio 2022]

- [12] Elosegui Capellán A., “Diseño de un motor síncrono de imanes permanentes para la propulsión de aviones regionales,” Universidad de Navarra 2021.
- [13] Great Magtech (XIAMEN) Electric CO, Estator magnético [en línea] <<https://es.greatmagtech.com/magnetic-assembly/magnetic-components/magnetic-stator.html>> [consulta: 3 de junio 2022]
- [14] Agencia de sostenibilidad energética, “Electromovilidad: Proyección y propuestas para avanzar,” Informe nro. 3, Santiago, Chile, 2018.
- [15] Zhang Z., Liu C., Chen X., Zhang C., y Chen J., “Annual energy consumption of electric vehicle air conditioning in China,” ELSEVIER, Volumen 125, pp. 567–574, 2017.
- [16] Xie Y., Liu Z., Liu J., Li K., Zhang Y., Wu C. y Wang X., “A Selflearning intelligent passenger vehicle comfort cooling system control strategy,” Applied Thermal Engineering, 166, 114646, 2020.
- [17] M. Castañon, R. Sanchez, “Compresores alternativos de alta eficiencia energética con tensión eléctrica a 220 V para uso de refrigeración comercial,” Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2013.
- [18] HYUNDAIPARTS.ONLINE, Compressor - Hyundai (97701-G7000) [en línea] <<https://www.hyundaiparts.online/oem-parts/hyundai-compressor-97701g7000>> [consulta: 3 de junio 2022]
- [19] Liu T., “Thermal management solutions for battery electric buses in cold climates,” 2019.
- [20] Nuclear Power, Heating and Air Conditioning | Characteristics [en línea] <<https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/heating-and-air-conditioning/>> [consulta: 3 de junio 2022]
- [21] Diario La Tercera, ¿Cuál es la temperatura más alta en la historia de Santiago? Este sábado podría superar los 37 °C [en línea] <<https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/cual-es-la-temperatura-mas-alta-en-la-historia-de-santiago-este-sabado-podria-superar-los-37/501016/>> [consulta: 6 de junio 2022]
- [22] Integrated Environmental Solutions (IES) , ASHRAE Heat Balance Method Radiant Time Series – what’s the difference? [en línea] <<https://www.iesve.com/discoveries/blog/3348/ashrae-heat-balance-method-radiant-time-series-whats-the-difference#:~:text=The%20Heat%20Balance%20Method%20calculates,each%20surface%20within%20a%20room.>> [consulta: 6 de junio 2022]
- [23] Fayazbakhsh M. A., Bahrami M., “Comprehensive modeling of vehicle air conditioning loads using heat balance method,” SAE technical paper, 1507, 2013.
- [24] Marcos D., Pino F., Bordons C., Guerra J. J., “The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle,” Applied Thermal Engineering, 66(1-2), pp. 646-656, 2014.

- [25] Cvok I., Skugor B., Deur J., “Control trajectory optimisation and optimal control of an electric vehicle HVAC system for favourable efficiency and thermal comfort,” *Optimization and Engineering*, 22(1), pp. 83-102, 2021.
- [26] Cengel Y. A., Ghajar A. J., “Conducción de calor en estado estacionario,” *Transferencia de Calor y Masa: fundamentos y aplicaciones*, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana, pp. 135-195, 2011.
- [27] Cengel Y. A., Ghajar A. J., “Convección natural,” *Transferencia de Calor y Masa: fundamentos y aplicaciones*, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana, pp. 519-561, 2011.
- [28] Cengel Y. A., Ghajar A. J., “Fundamentos de la radiación térmica,” *Transferencia de Calor y Masa: fundamentos y aplicaciones*, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana, pp. 683-721, 2011.
- [29] UPME I., “Apéndice A: Relaciones astronómicas sol-tierra,” *Atlas de radiación solar de Colombia*, pp. 115-124, 2019.
- [30] Stine W., Geyer M., “Power from the sun,” 2001.
- [31] Schewitzer C. A., “Elaboración de un modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global mensual para Chile central,” Universidad de Chile, 2007.
- [32] Centro de Energía, “Informe proyecto ruta sustentable,” 2021.
- [33] Ministerio de Energía, Explorador Solar [en línea] <<https://solar.minenergia.cl/exploracion>> [consulta: 2 de abril 2022]
- [34] Dirección meteorológica de Chile - Servicios climáticos, Red de estaciones automáticas [en línea] <<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoEmas>> [consulta: 3 de abril 2022]
- [35] GPS Visualizer [en línea] <<https://www.gpsvisualizer.com/>> [consulta: 7 de mayo 2022]
- [36] Cengel Y. A., Ghajar A. J., “Apéndice 2 - Tabla A-151: Propiedades del aire a presión de 1 atm,” *Transferencia de Calor y Masa: fundamentos y aplicaciones*, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana, p. 911, 2011.
- [37] Datos Mundial, Estatura media de hombres y mujeres en todo el mundo [en línea] <<https://www.datosmundial.com/estatura-promedio.php>> [consulta: 3 de junio 2022]
- [38] Bishop J. D., Martin N. P., Boies A. M. “ Cost-effectiveness of alternative powertrains for reduced energy use and CO2 emissions in passenger vehicles,” *Applied Energy*, 124, pp. 44-61, 2014.
- [39] Ejsmont J. A., Ronowski G. y Wilde W. J. “ Rolling resistance measurements at the MnROAD facility,” No. MN/RC 7, 2012.
- [40] Favoino F., Raheli E., Ramirez D., Pulosio F., Tavernese S., Simonetti M. y Masoero M., “ Impact of glass technology on future electrical individual transportation: the Pop. Up case study,” *Glass Structures Engineering*, 5(1), pp. 117-131, 2020.

Anexos

Anexo A. Trayectorias

A continuación, se presentan las trayectorias dibujadas para cada viaje, mediante la herramienta de Excel mapas 3D.

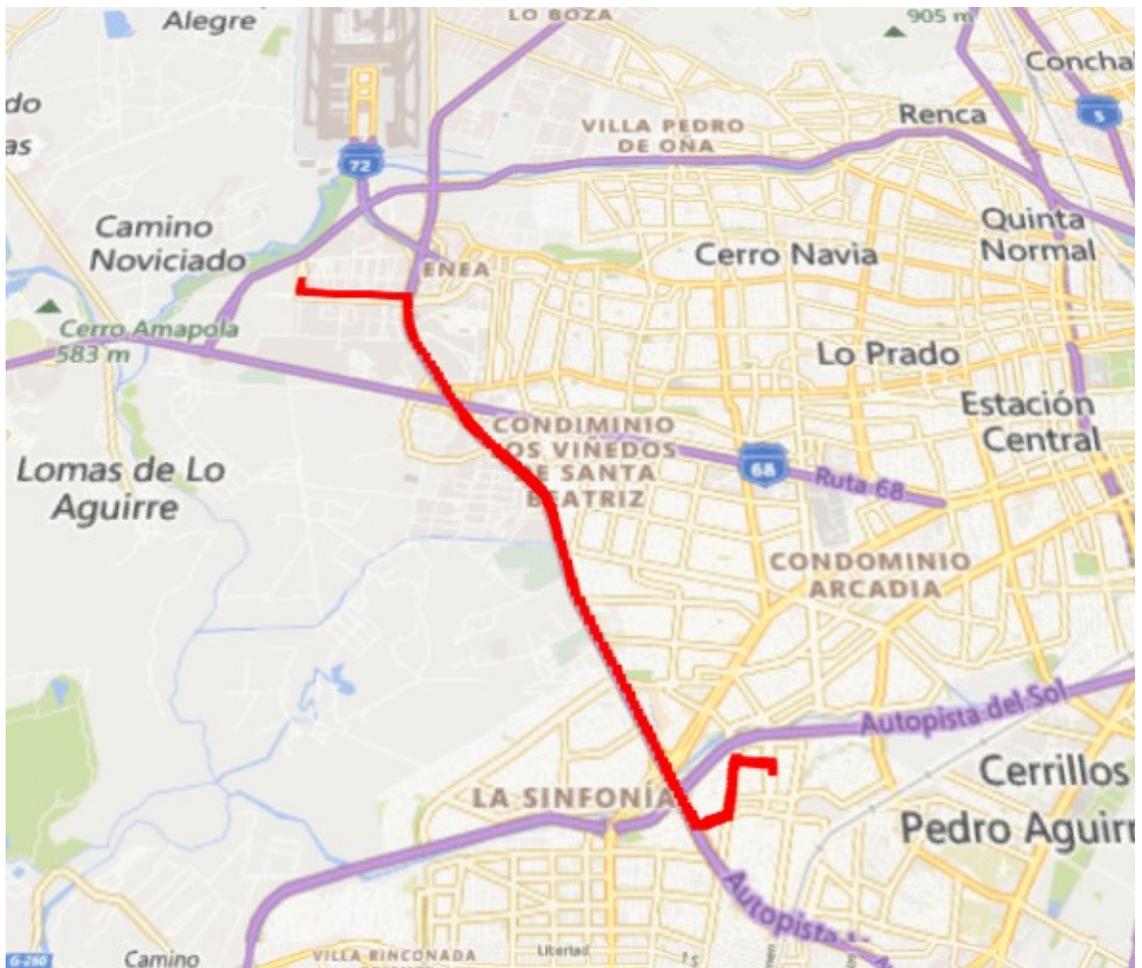


Figura A.1: Recorrido para viaje del 20 de enero.

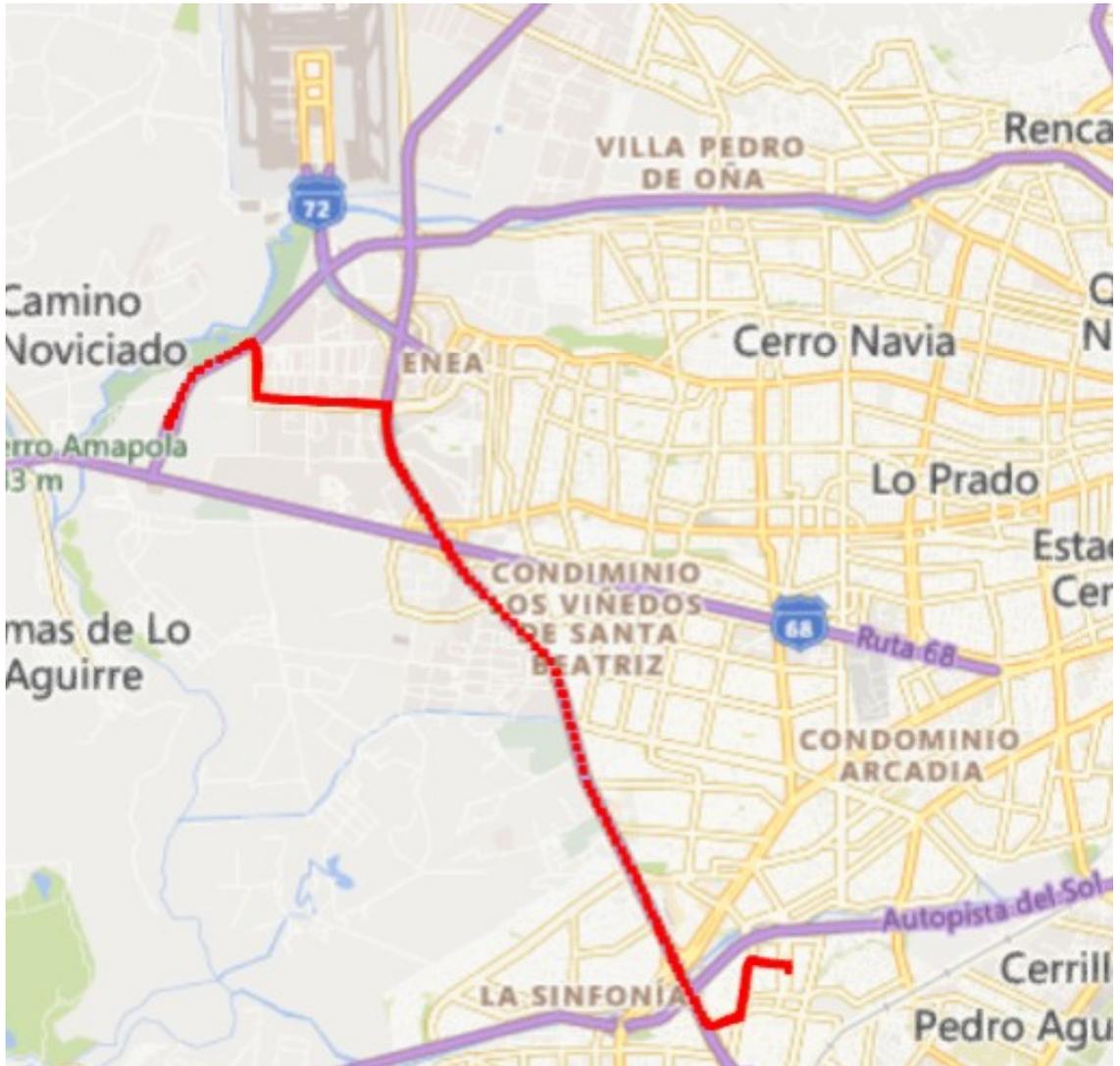


Figura A.2: Recorrido para viaje del 27 de enero.

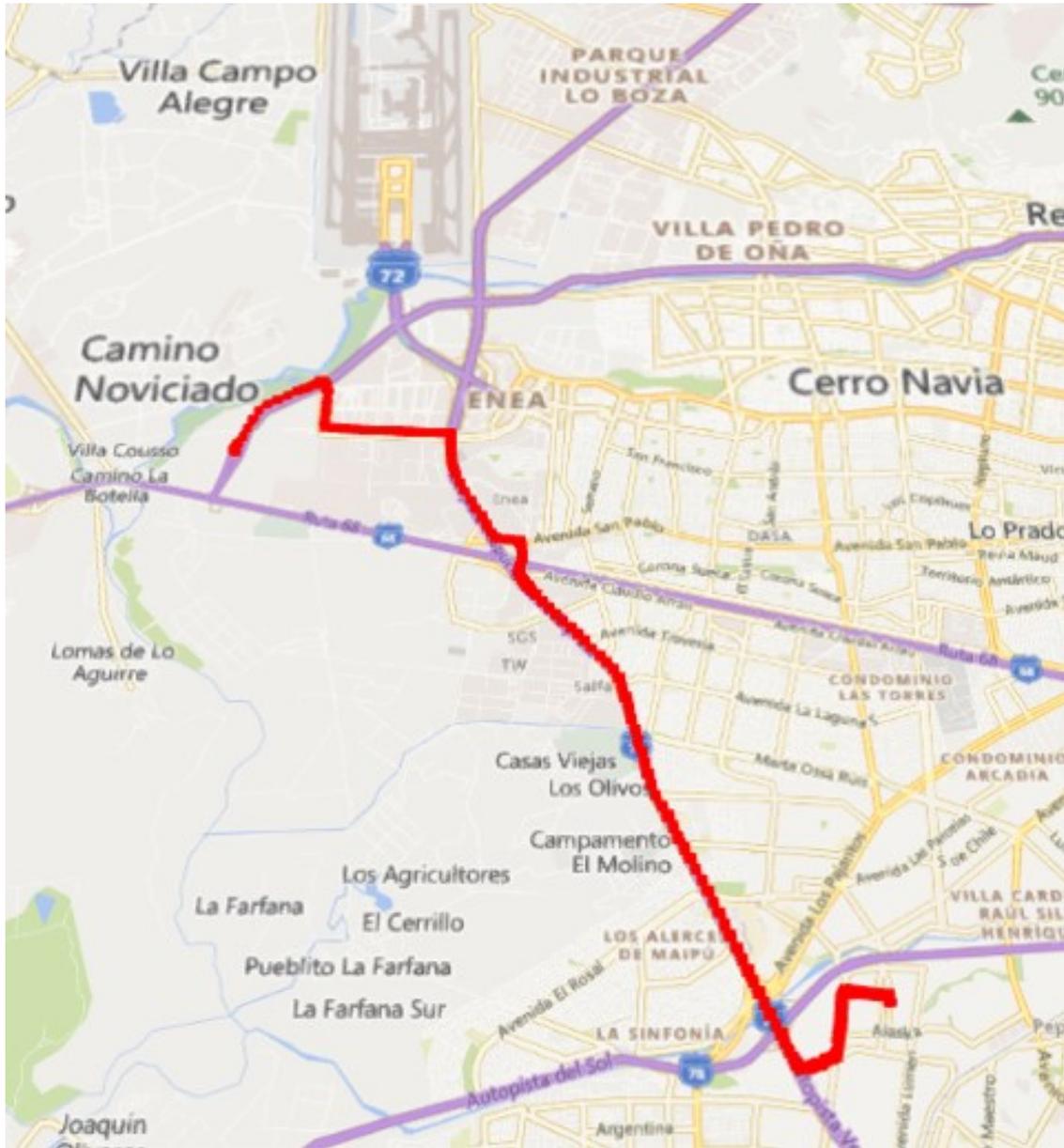


Figura A.3: Recorrido para viaje del 10 de febrero.

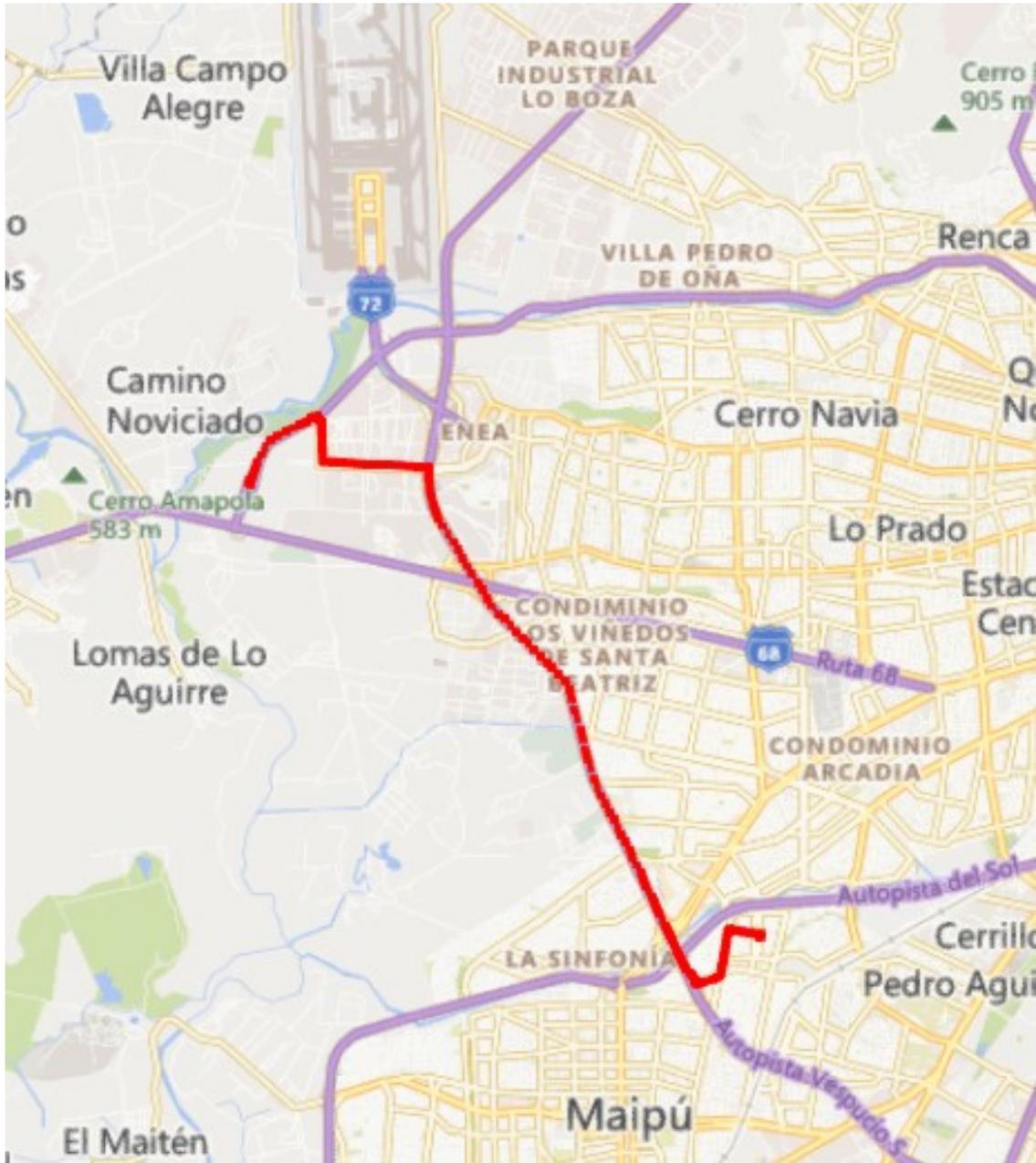


Figura A.5: Recorrido para viaje del 1 de abril.

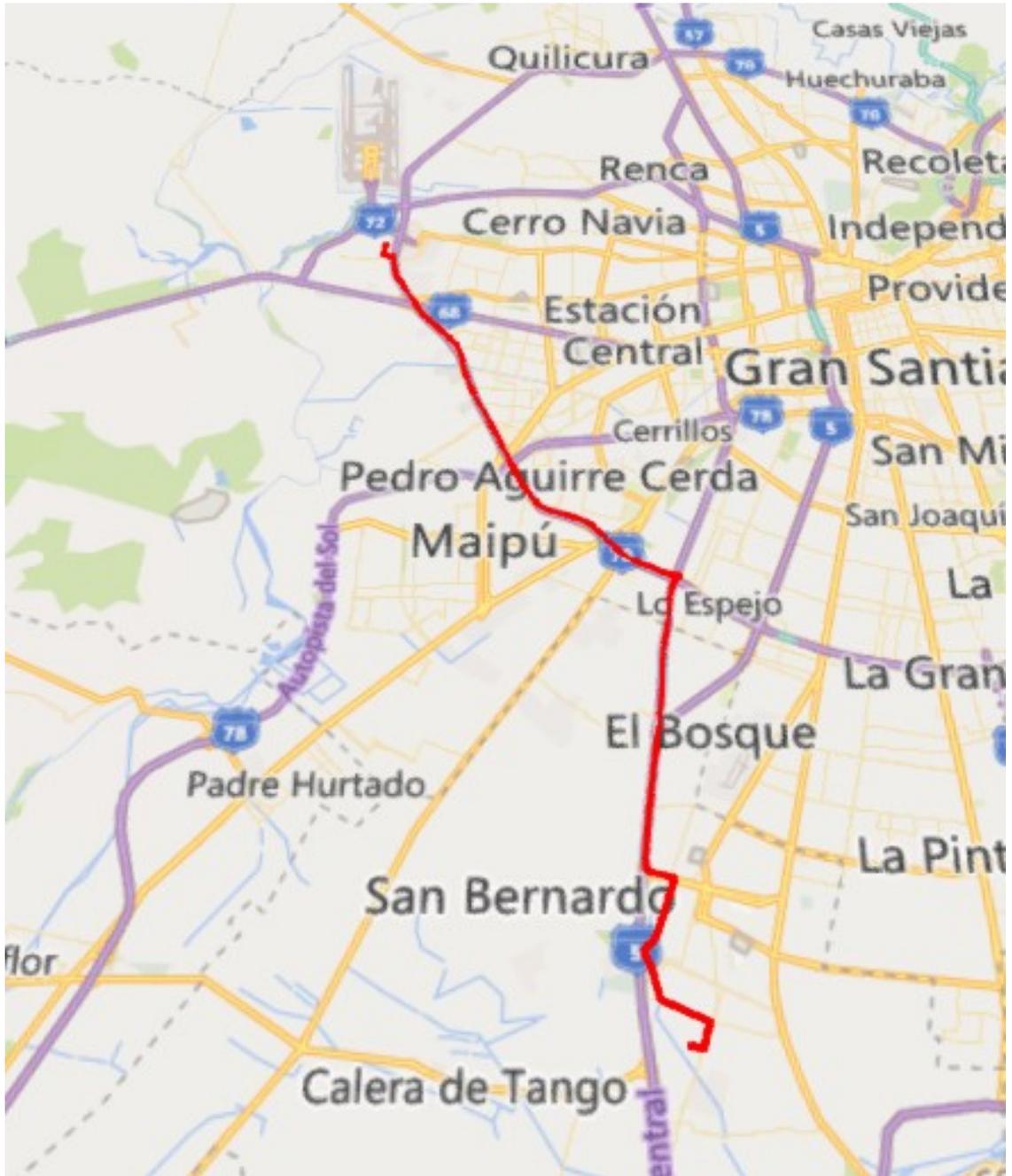


Figura A.6: Recorrido para viaje del 24 de enero.

Anexo B. Perfiles de velocidad

A continuación, se presentan los perfiles de velocidad para cada uno de los viajes estudiados.



Figura B.1: Perfil de velocidad viaje 20 de enero

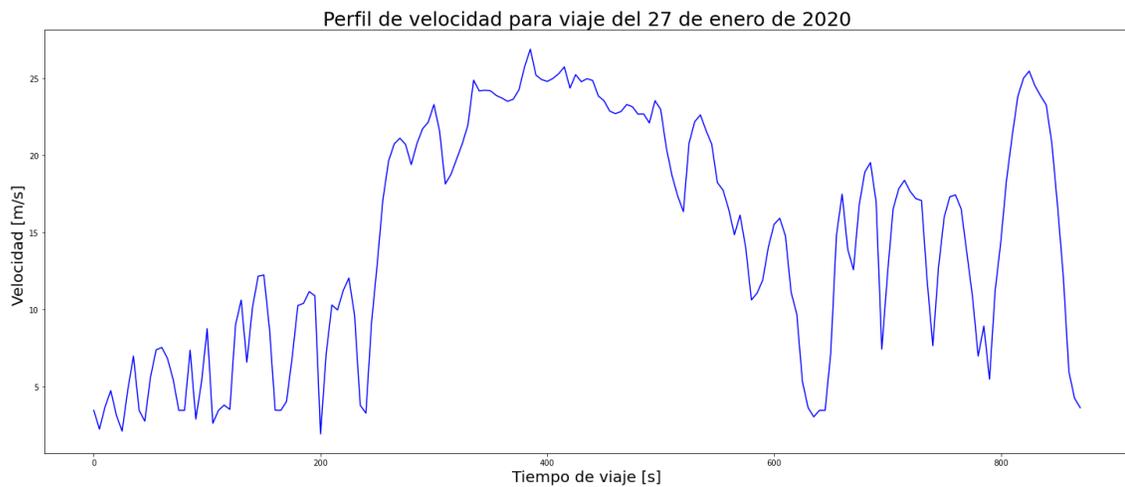


Figura B.2: Perfil de velocidad viaje 27 de enero

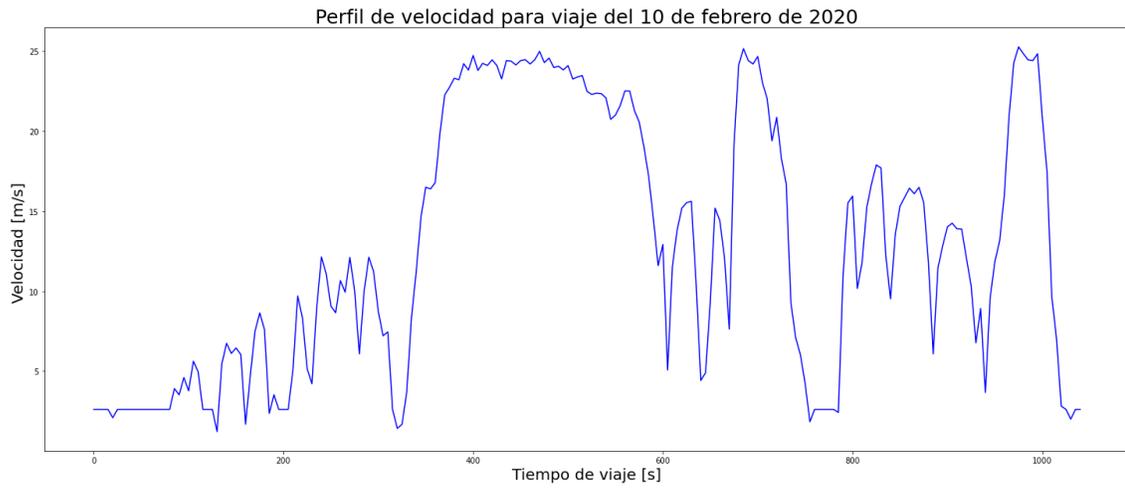


Figura B.3: Perfil de velocidad viaje 10 de febrero



Figura B.4: Perfil de velocidad viaje 21 de febrero



Figura B.5: Perfil de velocidad viaje 1 de abril

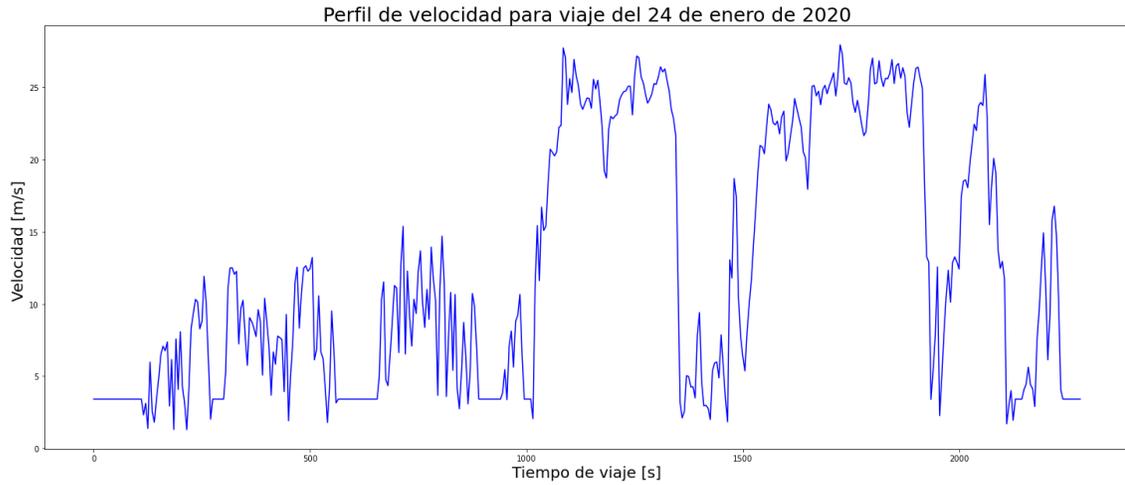


Figura B.6: Perfil de velocidad viaje 24 de enero

Anexo C. Distancias

A continuación, se presenta la distancia total recorrida por cada viaje, además de las variaciones en altitud que estos experimentan.

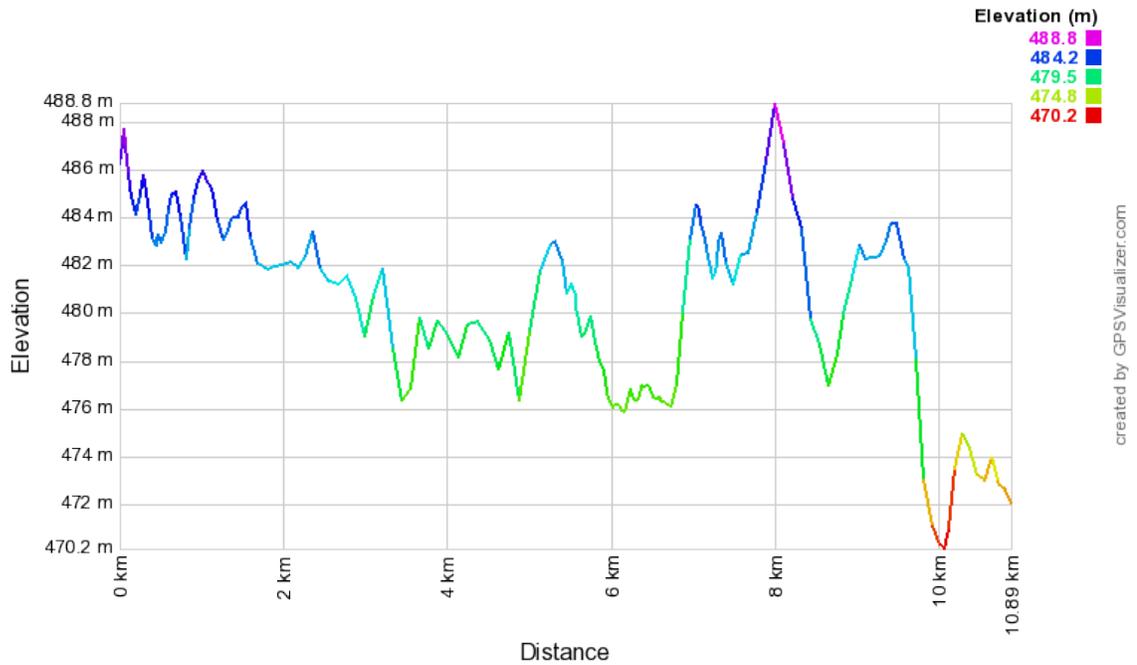


Figura C.1: Distancia total recorrida por el viaje del 20 de enero.

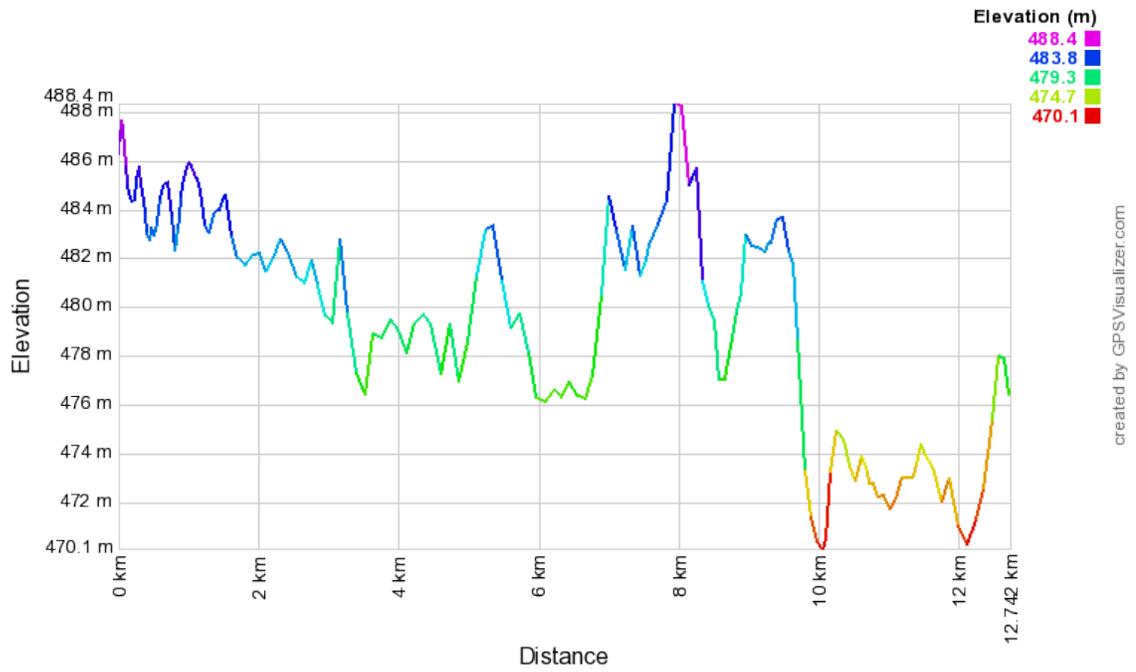


Figura C.2: Distancia total recorrida por el viaje del 27 de enero.

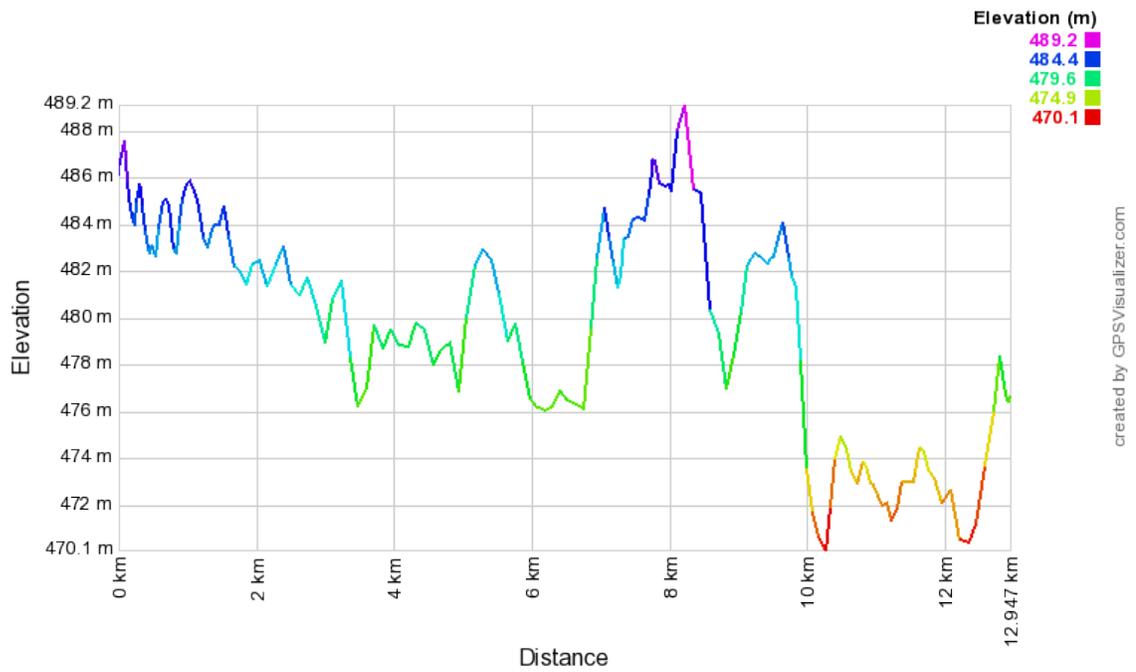


Figura C.3: Distancia total recorrida por el viaje del 10 de febrero.

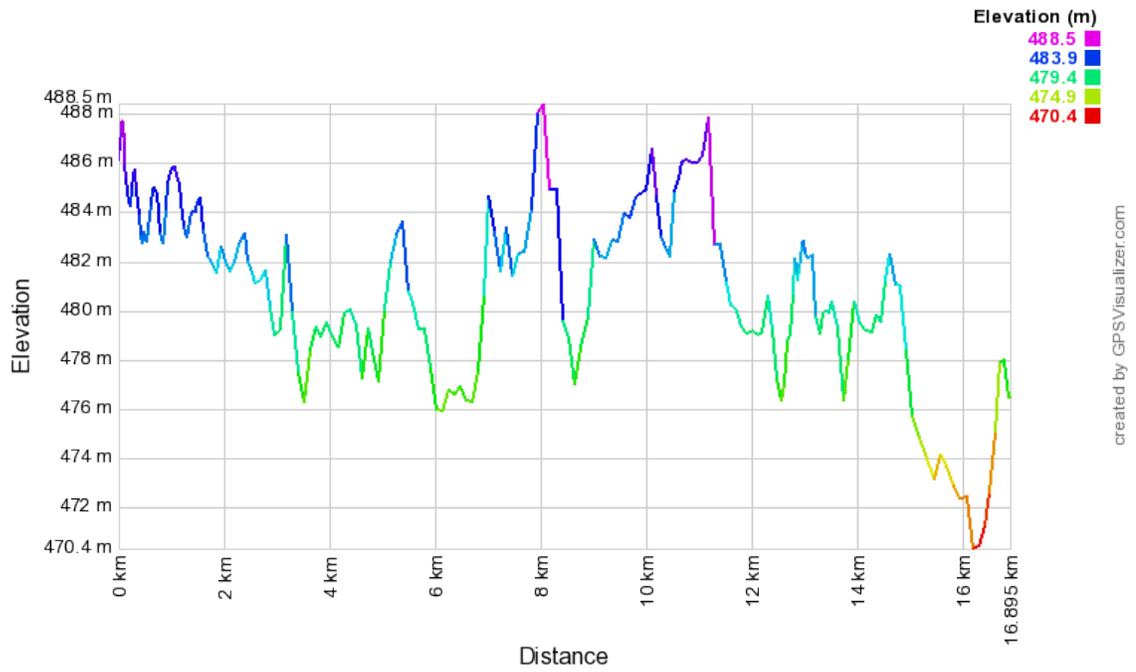


Figura C.4: Distancia total recorrida por el viaje del 21 de febrero.

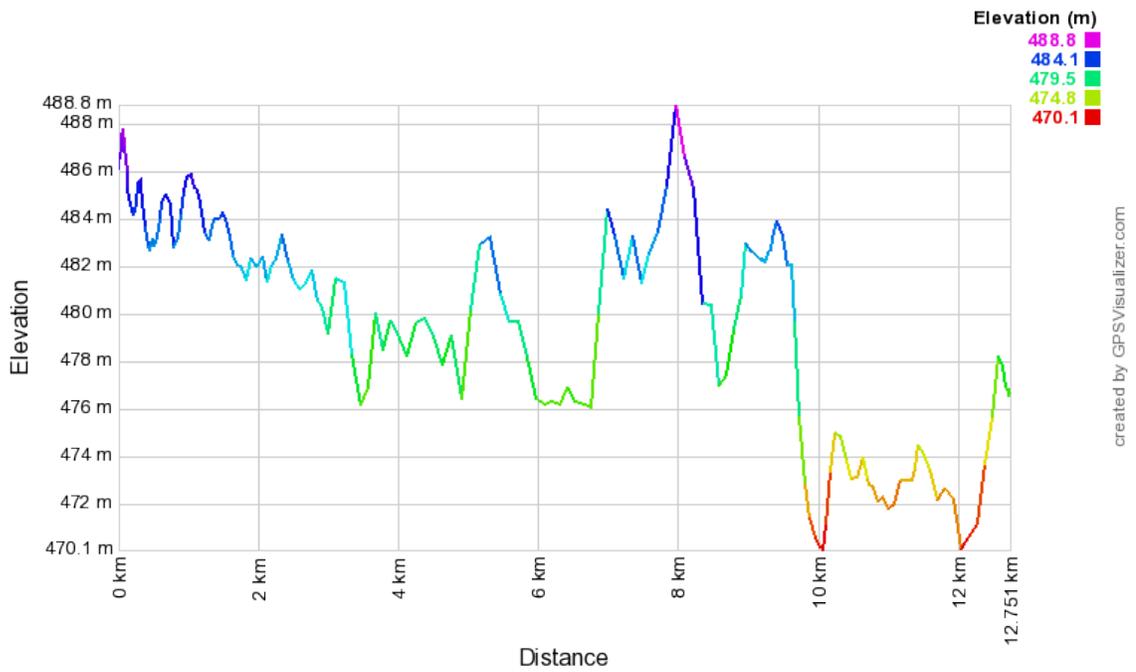


Figura C.5: Distancia total recorrida por el viaje del 1 de abril.

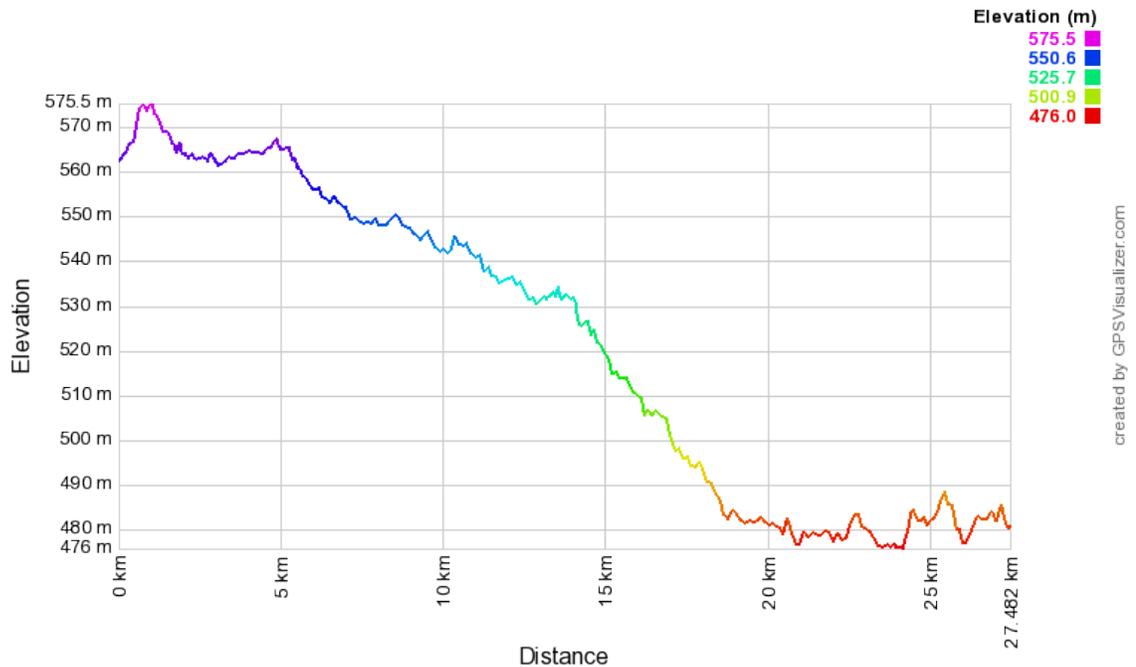


Figura C.6: Distancia total recorrida por el viaje del 24 de enero.

Anexo D. Código

Para graficar el efecto de la velocidad en las variaciones de potencia de aire acondicionado, se utiliza el siguiente código, desarrollado en lenguaje de programación Python, implementado en la plataforma Jupyter Notebook. Se muestra un ejemplo para la data extraída del viaje del 20 de enero.

Código D.1:

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from matplotlib.collections import LineCollection
5 import matplotlib.ticker as ticker
6 #Ejemplo para viaje del 20 de enero con convección natural
7
8
9 # Cambiar fuente por defecto del documento
10 plt.rcParams["font.family"] = 'Times New Roman'
11 plt.rcParams["font.size"] = 15
12 #Definicion de fuentes para casos particulares
13 fuente1={'family':'Times New Roman', 'style':'normal', 'weight':'bold', 'color':'black', 'size'
14         ↪ :21}
14 fuente2={'family':'Times New Roman', 'style':'normal', 'weight':'light', 'color':'black', 'size'
15         ↪ :18}

```

```

15 #Importar datos del viaje
16 data1=pd.read_excel('20enero.xlsx')
17 #Transformar a archivo de numpy
18 data1=data1.to_numpy()
19 #Se extraen los datos necesarios
20 #Velocidad
21 v1=data1[:,6]
22 #Paso de tiempo
23 pasol=data1[:,0]
24 #Potencia termica conveccion natural
25 qnat1=data1[:,1]
26 #se definen las variables
27 x = pasol
28 y = qnat1
29 z=v1
30 #Se crea un conjunto de segmentos de línea para que se puedan colorear individualmente
31 #Esto crea los puntos como una matriz N x 1 x 2 para que se puedan apilar fácilmente y así
    ↪ obtener los segmentos.
32 #La matriz de segmentos para la recopilación de líneas debe ser (líneas numéricas) x (puntos
    ↪ por línea) x 2 (para x e y)
33 points = np.array([x, y]).T.reshape(-1, 1, 2)
34 segments = np.concatenate([points[:-1], points[1:]], axis=1)
35
36 fig, ax = plt.subplots()
37
38 # Se establecen los limites del grafico
39 ax.set_xlim(np.min(x), np.max(x))
40 ax.set_ylim(np.min(y), np.max(y))
41 # Se crea una norma continua para mapear la variable velocidad desde puntos de datos hasta
    ↪ colores
42 norm = plt.Normalize(z.min(), z.max())
43 line_segments = LineCollection(segments, cmap='viridis', norm=norm)
44 #Dimensiones del grafico
45 fig.set_figwidth(20)
46 fig.set_figheight(10)
47 #Se establecen los valores utilizados para el mapeo de colores
48 line_segments.set_array(z)
49 line_segments.set_linewidth(2)
50 line=ax.add_collection(line_segments)
51 axcb = fig.colorbar(line,ax=ax)
52 axcb.set_label('Velocidad [m/s]',fontsize=18)
53 ax.set_title('Potencia AC frente a variación de la velocidad del vehículo para viaje del 20 de
    ↪ enero (CN)', fontdict=fuente1)
54 plt.xlabel("Tiempo de viaje [s]")
55 plt.ylabel("Potencia HVAC [kW]")

```

```
56 #Se define la fuente y el tamaño de la linea de eje
57 plt.xticks(fontsize=20, family='Times New Roman')
58 plt.yticks(fontsize=20, family='Times New Roman')
59 #Titulo de los ejes
60 plt.xlabel("Tiempo de viaje [s]",fontdict=fuente2)
61 plt.ylabel("Potencia AC [kW]", fontdict=fuente2)
62 #Grid para el grafico
63 plt.grid(linestyle=':')
64 plt.show()
```