



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

## ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS POR CLIMATIZACIÓN AL INTERIOR DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DOMINGO JOSÉ CORVALÁN ROCA

PROFESOR GUÍA:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JORGE REYES MARAMBIO  
ALVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA  
POR: DOMINGO JOSÉ CORVALÁN ROCA  
FECHA:2022  
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

## ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS POR CLIMATIZACIÓN AL INTERIOR DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

El siguiente trabajo es una estimación de los costos que tiene climatizar y mantener climatizada la cabina de un vehículo eléctrico en distintos meses del año con el fin de poseer más información sobre el comportamiento de este gasto energético y su costo.

Los vehículos eléctricos son vehículos que utilizan como fuente de energía para su movilización la electricidad, mediante el almacenamiento de esta en un paquete de baterías con el fin de energizar el o los motores eléctricos que se utilizan para movilizar el vehículo. Además, los sistemas de climatización también son energizados por este paquete de baterías, lo cual influye en el rango de autonomía del vehículo.

Es por esto último que en este trabajo se utilizarán los datos recabados por telemetría de una flota de autos Hyundai Ioniq completamente eléctricos, con la finalidad de estimar las transferencias de calor que ocurren entre el medio ambiente y la cabina y así poder estimar la carga que el sistema de climatización debe tener para llevar a la cabina a una temperatura de confort de 20 [C] y mantener esa temperatura por el resto del viaje.

Las transferencias de calor se calcularon con Microsoft Excel teniendo en cuenta el calor que el sol le entrega tanto a la cabina por los vidrios como a la carrocería, el calor que se transmite entre la carrocería al medio ambiente, el calor que es transmitido entre el medio ambiente y la cabina, el calor transmitido entre la carrocería y la cabina, y por ultimo el calor que los propios pasajeros le entregan a la cabina.

Con estas transferencias calculadas y con la carga del sistema de climatización calculada se pueden estimar los costos que se tuvo en la climatización de la cabina en cada mes de funcionamiento. Estos costos fueron calculados en base a 6 tarifas de energía (Enel X CCS y tipo 2, Copec Voltex CCS y tipo 2, Enel tarifa BT1 y BT4.3) y van desde los 2,4[\$/km] en el mes de Mayo con tarifa BT4.3 (Incluye IVA) hasta los 15,9[\$/km] en el mes de Febrero con tarifa de Copec Voltex con carga rápida.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos y la correlación que tienen con la temperatura ambiente promedio del mes y la eficiencia de los viajes. De este análisis se desprende que a medida que avanza el año y la temperatura ambiente junto con la radiación solar disminuyen, el sistema de climatización tendrá una eficiencia cada vez mayor al no tener que utilizar el aire acondicionado de forma drástica y al comenzar a utilizarlo de forma moderada junto con el sistema de calefacción en algunas ocasiones.

*La perspectiva de uno cambia cuando entiende que  
hay que hacer que las cosas pasen.*

***Saludos***

# Agradecimientos

Quiero comenzar esta sección de agradecimientos agradeciéndole a las personas que más quiero y que más me han ayudado a lo largo de mi vida, mi familia. Les agradezco a mis padres Gonzalo y Elizabeth que trabajaron duro día a día para entregarme la mejor educación, salud y vida que podría haber pedido. Que gracias a su trabajo yo pude dedicarme de lleno a mis estudios, facilitándome hoy este logro. Y quiero agradecerles por lo más importante, criarme en una familia con amor, en la cual me apoyaron en todo desde el día uno.

Junto con mis padres quiero agradecerle a mi hermano Gonzalo y a mi hermana Josefa, por ser parte de esta hermosa familia con una dinámica única, por quererme, cuidar de mi, apoyarme y ser mi ejemplo a seguir.

Quiero seguir esta sección agradeciéndole a mi grupo de amigos del colegio, los Rebus, que hasta el día de hoy seguimos teniendo contacto, viéndonos y organizando salidas. A ellos les agradezco por el apoyo que me han entregado como amigos, por todas las instancias que vivimos y compartimos a lo largo de los años, que al final del día siempre me alegraba al verlos. Les agradezco por ser amigos incondicionales que aportaron en mi proceso de formación profesional.

Le agradezco también a todos los amigos que hice estando en la universidad. A los que ya no veo tanto les agradezco por ayudarme en los primeros años de la carrera y por dejarme las enseñanzas de vida que me dejaron. Y a los que siguen ahí presentes, les agradezco por apoyarme en los estudios y en periodos de estrés, por su capacidad de inclusión y de dejar de lado los estereotipos, a ellos les agradezco por valorarme por quien soy como persona y no por donde vengo. A ellos les agradezco por enseñarme que la universidad también podía ser un lugar de diversión donde podía pasarlo bien.

Finalmente le agradezco a todas las personas que trabajan en la universidad. Le agradezco al personal del aseo por mantener mi hermoso campus hermoso, al personal de seguridad por hacer que cada día que estuve en la facultad me sintiera y estuviera lo más seguro posible. A los funcionarios de las cafeterías les agradezco por atender a todo el mundo con una sonrisa en el rostro, siendo capaces de alegrar aunque sea un poco los días difíciles en el campus. Y por ultimo, le agradezco al cuerpo docente, por enseñar con vocación, dedicación y pasión por la carrera. Y por guiar en lo que pueden a los estudiantes en esta etapa tan valiosa e importante llamado universidad.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Antecedentes generales . . . . .	3
1.4. Alcances . . . . .	3
1.4.1. Alcances para el modelo de estimaciones . . . . .	3
1.4.2. Alcances para las estimaciones de consumo . . . . .	4
1.4.3. Alcances para las estimaciones de costos . . . . .	4
1.4.4. Alcances para el análisis de resultados . . . . .	4
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Datos recabados sobre una flota de taxis eléctricos . . . . .	5
2.2. Hyundai Ioniq . . . . .	6
2.3. Modelo de referencia . . . . .	7
<b>3. Metodología</b>	<b>9</b>
3.1. Análisis de datos . . . . .	9
3.2. Creación del modelo de estimaciones . . . . .	10
3.3. Estimación de factores pertinentes . . . . .	11
3.4. Estimación de carga del sistema HVAC . . . . .	11
3.5. Estimación de costos . . . . .	12
3.6. Análisis de resultados . . . . .	12
<b>4. Modelo de estimaciones</b>	<b>14</b>
4.1. Parámetros que calcula el modelo . . . . .	15
4.1.1. Flujo de calor desde el sol y la carrocería en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{sol,carr,i}$ ) . . . . .	15
4.1.2. Flujo de calor entre carrocería y medio ambiente en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{carr,amb,i}$ ) . . . . .	15
4.1.3. Flujo de calor entre carrocería y cabina en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{carr,cab,i}$ ) . . . . .	17
4.1.4. Temperatura de la carrocería en un instante de tiempo ( $T_{carr,i}$ ) . . . . .	18
4.1.5. Flujo de calor entre el medio ambiente y la cabina en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{amb,cab,i}$ ) . . . . .	19
4.1.6. Flujo de calor desde el sol a la cabina en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{sol,cab,i}$ )	19
4.1.7. Flujo de calor metabólico ( $\dot{Q}_{met}$ ) . . . . .	20

4.1.8.	Flujo de calor total en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{tot,i}$ ) . . . . .	21
4.1.9.	Carga del sistema de climatización en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{HVAC,i}$ ) . . . . .	21
4.1.10.	Temperatura de la cabina en un instante de tiempo ( $T_{cab,i}$ ) . . . . .	22
4.1.11.	Energía consumida por el sistema de climatización en un instante de tiempo ( $E_{HVAC,i}$ ) . . . . .	23
4.1.12.	Distancia recorrida en un instante ( $D_i$ ) . . . . .	23
4.2.	Calculo de resultados . . . . .	23
4.2.1.	Energía total utilizada por el vehículo $E_{tot}$ . . . . .	23
4.2.2.	Energía total utilizada por el sistema HVAC ( $E_{HVAC,tot}$ ) . . . . .	24
4.2.3.	Distancia total recorrida por el vehículo ( $D_{tot}$ ) . . . . .	24
4.2.4.	Tiempo total transcurrido en el trayecto ( $t_{tot}$ ) . . . . .	24
4.2.5.	Relación de consumo sistema HVAC ( $\%_{HVAC}$ ) . . . . .	24
4.2.6.	Eficiencia del sistema HVAC ( $C_{km/kWh}$ ) . . . . .	25
4.2.7.	Costo de climatización por kilometro ( $C_{\$/km}$ ) . . . . .	25
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>26</b>
5.1.	Resultados de consumo energético por climatización de la cabina . . . . .	26
5.2.	Resultado de costos por climatización de la cabina . . . . .	29
<b>6.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>32</b>
6.1.	Análisis sobre recorridos entre las 8:00 y 20:00 horas . . . . .	32
6.2.	Análisis sobre recorridos entre las 14:30 y 16:30 horas . . . . .	33
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>35</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>37</b>
	<b>Anexo</b>	<b>38</b>
A -	Especificaciones técnicas Hyundai Ioniq . . . . .	38
B -	Datos extraídos del explorador solar . . . . .	40
	Radiación solar . . . . .	40
	Temperatura ambiente . . . . .	40
C -	Modelo CAD de la cabina . . . . .	41
	Confeción del modelo CAD . . . . .	41
	Resultados del modelo CAD . . . . .	43

# Índice de Tablas

3.1.	Tarifas de energía según proveedores principales (IVA incluido). . . . .	12
4.1.	Parámetros del aire y cabina. . . . .	17
4.2.	Parámetros de la cabina y carrocería. . . . .	18
4.3.	Parámetros de la carrocería. . . . .	18
4.4.	Parámetros de los vidrios de la cabina. . . . .	19
4.5.	Parámetros de funcionamiento sistema HVAC. . . . .	21
4.6.	Parámetros del aire en la cabina. . . . .	22
5.1.	Resultados de consumo mes de Enero. . . . .	26
5.2.	Resultados de consumo mes de Febrero. . . . .	26
5.3.	Resultados de consumo mes de Marzo. . . . .	27
5.4.	Resultados de consumo mes de Abril. . . . .	27
5.5.	Resultados de consumo mes de Mayo. . . . .	27
5.6.	Resumen de consumos energéticos. . . . .	27
5.7.	Resultados sobre viajes específicos entre las 14:30 y 16:30 horas. . . . .	29
5.8.	Costos por climatización en cada mes en CLP por kilometro según las distintas tarifas (horario de 8:00 a 20:00 horas). . . . .	29
5.9.	Costos por climatización en cada mes en CLP por kilometro según las distintas tarifas (horario de 14:30 a 16:30 horas). . . . .	30
.1.	Ficha técnica Hyundai Ioniq. . . . .	38
.2.	Radiación solar promedio por hora en cada mes [ $W/m^2$ ]. . . . .	40
.3.	Temperatura ambiente promedio por hora en cada mes [C]. . . . .	41
.4.	Volúmenes calculados por el modelo CAD. . . . .	44
.5.	Superficies calculadas por el modelo CAD. . . . .	44

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Hyundai Ioniq eléctrico. . . . .	6
2.2.	Modelo expuesto en publicación de Cvok, Skugor y Deur. . . . .	7
2.3.	Parámetros de funcionamiento del sistema de climatización según publicación de Cvok, Skugor y Deur. . . . .	8
3.1.	Metodología a seguir. . . . .	9
4.1.	Esquema del modelo de estimaciones de carga de sistema HVAC. . . . .	14
5.1.	Evolución de la eficiencia energética del sistema HVAC en los distintos meses (horario de 8:00 a 20:00 horas). . . . .	28
5.2.	Evolución del consumo energético del sistema HVAC en relación al consumo global del vehículo en los distintos meses (horario de 8:00 a 20:00 horas). . . . .	28
5.3.	Gráfico de costos por climatización en cada mes en CLP por kilometro según las distintas tarifas (horario de 8:00 a 20:00 horas). . . . .	30
5.4.	Gráfico de costos por climatización en cada mes en CLP por kilometro según las distintas tarifas (horario de 14:30 a 16:30 horas). . . . .	31
.1.	Modelo CAD de la cabina con fotos de referencia utilizadas. . . . .	42
.2.	Modelo CAD de la cabina sin fotos de referencia. . . . .	42
.3.	Modelo CAD de la cabina sin tablero ni consola central. . . . .	43
.4.	Modelo CAD de los asientos del Hyundai Ioniq. . . . .	43

# Capítulo 1

## Introducción

Los vehículos eléctricos son vehículos que utilizan energía eléctrica como principal fuente de energía para su movilización. Estos no poseen la configuración clásica de un vehículo con motor a combustión interna, sino que cuentan con un paquete de baterías el cual es utilizado para energizar principalmente los motores eléctricos que le dan movilidad al vehículo.

A diferencia de un vehículo con motor de combustión interna, un vehículo eléctrico no posee un sistema de aire acondicionado que aproveche el movimiento rotacional que el motor genera para energizar un compresor que enfriara el aire que entra a la cabina. Estos vehículos tampoco poseen un sistema de calefacción que aproveche el calor emitido por este motor de combustión interna para así calentar el aire que ingresará a la cabina.

Es por esto que los vehículos eléctricos cuentan generalmente con un motor eléctrico que energizará el compresor de aire acondicionado y con una bomba de calor. Ambos sistemas están energizados por la misma electricidad que utiliza el vehículo para moverse, por lo que su uso afectará a la energía disponible para la movilización y en consecuencia, afectará al rango de autonomía que tenga el vehículo y sus costos operacionales.

Esto crea un problema en los vehículos eléctricos, dado que al no saber como afecta la climatización en el consumo, no se puede tener un panorama completo sobre los consumos y costos que se tienen. Además, sumado a que uno de estos vehículos se demora más en recargar la batería de lo que un vehículo con motor de combustión interna en recargar el estanque con combustible, es un factor que afectará el uso que se le podrá dar a estos vehículos, limitándolo en comparación a sus pares de combustión.

### 1.1. Motivación

El mercado de los vehículos eléctricos comenzó a crecer de forma sostenida con la llegada del Tesla Modelo S a los mercados, este vehículo inició una carrera por la creación del mejor auto eléctrico en el mercado.

Los diferentes fabricantes de autos han enfocado sus esfuerzos al desarrollo de vehículos eléctricos, fabricantes como BMW, Volkswagen Auto Group, Hyundai, entre otros han comenzado a lanzar vehículos eléctricos al mercado en los últimos años, lo que ha generado un

crecimiento exponencial en la oferta y número de venta de vehículos eléctricos en el mundo.

Uno de los factores más importantes en este mercado es el rango de autonomía de cada modelo, esto debido a los largos tiempos que requiere cargar la batería de un auto eléctrico en comparación a la recarga del estanque en un auto de combustión y a la infraestructura de carga de cada país, que de no ser suficientemente extensa, puede limitar los viajes posibles con el vehículo.

Por otro lado, debido al calentamiento global, hoy en día mantener la cabina del vehículo climatizada es una necesidad y no un privilegio, ya que el no climatizar la cabina puede ser perjudicial para la salud de los ocupantes y su seguridad.

Además, estos sistemas de climatización son energizados por la misma energía que moviliza al vehículo, por lo que su uso tiene un efecto negativo en el rango de autonomía del vehículo y por ende aumenta sus costos operacionales

Esto lleva a querer saber el consumo de energía y costo que se tiene por el mantener la cabina climatizada, dado que no se poseen datos concretos sobre esto y es un factor importante en el consumo de energía del vehículo. Saber más sobre estos consumos y costos puede ser beneficioso para poder gestionar flotas de vehículos eléctricos de forma óptima.

## **1.2. Objetivos**

Para este trabajo de título se plantea un objetivo general, el cual hace alusión a resolver el problema de fondo del trabajo. Además de 4 objetivos específicos, que corresponden a hitos necesarios a cumplir para resolver el problema de fondo.

### **1.2.1. Objetivo General**

- Estimar los costos que tiene mantener la cabina de un vehículo eléctrico climatizada en base a los datos recabados de vehículos en condiciones de uso reales.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Crear un modelo que permita estimar la carga del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en ingles).
- Realizar una estimación de la energía consumida por el sistema HVAC en cada mes de análisis.
- Realizar una estimación de los costos por climatización para cada mes según diferentes distribuidores de energía.
- Realizar un análisis sobre los resultado obtenidos para cada mes relacionando dichos resultados con el modo en que el modelo de estimaciones funciona y con las condiciones ambientales de cada mes.

## 1.3. Antecedentes generales

Los vehículos eléctricos utilizan energía eléctrica proveniente de un paquete de baterías para su movilización, por lo que el rango de autonomía de estos vehículos esta limitado por la cantidad de energía que pueda almacenar el paquete de baterías y del uso que se le de a esta energía.

este mismo paquete de baterías es el encargado de energizar los computadores, pantallas y sistemas auxiliares del vehículo, por lo que el rango de autonomía disminuye en la medida que estos sistemas requieran de energía.

Uno de los sistemas auxiliares más importantes y de mayor consumo que energiza el paquete de baterías es el sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado, más conocido en ingles como heating, ventilation, and air conditioning (HVAC). Por lo que el uso de este tiene efectos que disminuyen la autonomía del vehículo de forma significativa.

Se han realizado estudios sobre cuanta de la energía consumida por un vehículo eléctrico es utilizada solamente por el sistema HVAC, pero no se poseen datos concretos sobre la utilización de energía de este sistema.

Es por esto que se recabaron datos de funcionamiento sobre una flota de taxis eléctricos mediante el uso de telemetría con el fin de poder estudiar el consumo energético que conlleva mantener la cabina climatizada.

## 1.4. Alcances

Para este trabajo se fijaron los alcances según el tópico que se este tratando, esto con el fin de lograr los resultados esperados en cada etapa de forma óptima. De esta forma se fijaron los alcances para el modelo de estimaciones, para las estimaciones de consumo energético, las estimaciones de costos y el análisis de los resultados.

### 1.4.1. Alcances para el modelo de estimaciones

El modelo de estimaciones se realizará en base a un Huyndai Ioniq eléctrico, por lo que se utilizarán valores que puedan ser obtenidos mediante el catalogo de este vehículo, aquellos valores que no se encuentren como el grosor de los vidrios y del aislante serán estimados en base a otros vehículos de dimensiones similares.

Además, este modelo diferenciará entre superficies metálicas y vidrios en la cabina con el fin de lograr una mejor precisión en los resultados, esto debido a que la radiación solar afecta de forma distinta a dichas superficies.

Por ultimo, será implementado en Microsoft Office Excel y buscará llevar la cabina del vehículo de la temperatura a la que este cuando se inicia el viaje hasta los 20 [C], ya sea

mediante la calefacción o enfriamiento de esta.

### **1.4.2. Alcances para las estimaciones de consumo**

Para las estimaciones del consumo energético por climatización de la cabina se utilizarán los datos recabados por telemetría sobre los taxis en cuestión que no presenten errores en los valores del "State of Charge", debido a que con estos datos se estimará la energía consumida en total por el vehículo. Si bien este dato no entrega el consumo más preciso, es el que posee menos fallas de muestreo por lo que permite analizar un universo de viajes mayores.

Además, las estimaciones se realizarán sobre un vehículo en cada mes, dicho vehículo debe cumplir la condicione de haber realizado al menos dos viajes al mes, cada uno de estos viajes debe ser de al menos 10 kilómetros de recorrido.

Finalmente las estimaciones serán por día y por mes, con la finalidad de poder analizar si existe alguna tendencia a escala mensual con el consumo y lo que ocurre en días con viajes similares en los distintos meses. Estas estimaciones serán principalmente sobre el consumo del sistema HVAC en relación al consumo global, además de, consumo del sistema HVAC por kilometro.

### **1.4.3. Alcances para las estimaciones de costos**

Las estimaciones sobre el costo por climatización serán realizadas utilizando los valores de referencia de 6 tarifas distintas, dichas tarifas son Enel X con carga normal y rápida, Copec Voltex con carga normal y rápida, y por ultimo Enel con tarifas BT1 y BT4.3.

Además, estas estimaciones de costos serán por mes y se mostrarán en costo por kilometro recorrido en cada mes con el fin de poder comparar mes a mes cuanto cuesta recorrer un kilometro mientras se climatiza la cabina.

### **1.4.4. Alcances para el análisis de resultados**

Se realizará tanto un análisis global de los consumos y costos como un análisis específico sobre viajes similares que se puedan encontrar en distintos meses.

# Capítulo 2

## Antecedentes

Como se mencionó anteriormente, los vehículos eléctricos poseen un paquete de baterías el cual energiza tanto los motores eléctricos que movilizan el vehículo, como los sistemas auxiliares de seguridad, pantallas, confort y climatización.

Debido a los rangos de autonomía limitados y los tiempos de carga elevados que se necesitan para recargar la batería entre un 80 % y un 100 % de su capacidad de carga, los vehículos eléctricos no son capaces de cubrir distancias muy largas en un periodo de tiempo acotado, como es el caso de los vehículos de combustión. Esto hace que toda la energía almacenada sea importante para los vehículos eléctricos.

### 2.1. Datos recabados sobre una flota de taxis eléctricos

Para afrontar este problema, entre Enero y Mayo del 2020 se recopilaron datos de funcionamiento sobre una flota de Hyundai Ioniq eléctricos los cuales eran utilizados como taxis que, por lo general, realizaban viajes entre el aeropuerto Arturo Merino Benítez y el sector oriente de la capital.

Dentro de los datos recopilados, destacan para este trabajo la fecha, la hora, las coordenadas geográficas, la altitud, la corriente, voltaje y potencia de la batería, el estado de carga o "State of Charge"(SOC) y el uso de los puertos de carga rápida y normal.

Todos estos datos fueron recabados mediante el uso de un sistema de telemetría instalado en cada vehículo y que recopilaba los parámetros de funcionamiento cada 5 segundos en la gran mayoría de los casos.

Es importante notar que estos datos recopilados presentan problemas e inconsistencias que se pueden deber a una inconsistencia del conductor del vehículo al encender y apagar los sistemas de telemetría, además de inconsistencias en los días de circulación de cada vehículo.

Además, se encontraron errores en algunos datos recopilados como el estado de carga de la batería y la potencia de esta, siendo identificado el error por las inconsistencias del estado de carga de la batería en cada intervalo de tiempo, dado que este mismo fluctuaba de forma

importante en cada intervalo de 5 segundos y en algunos casos se quedaba fijo en un mismo valor mientras el vehículo se desplazaba durante horas. Esto mismo ocurre con los valores de la potencia de la batería en algunos casos.

## 2.2. Hyundai Ioniq

El Hyundai Ioniq fue presentado en el año 2016 en el salón del automóvil de Ginebra, el modelo se clasifica como un liftback de 5 puertas capaz de albergar a 5 ocupantes al mismo tiempo. Uno de los aspectos más interesantes en el momento de su lanzamiento fueron las versiones en las que se ofrecería el Ioniq, ya que el modelo se ofrece en versión híbrido, híbrido enchufable y full eléctrico.

Tanto el Ioniq híbrido como el híbrido enchufable poseen un motor 1.6L de 4 cilindros con ciclo Atinos. A diferencia del híbrido, el híbrido enchufable puede ser recargado mediante un cargador externo y posee una batería de 8.9 [kWh] de capacidad, a diferencia de su para no enchufable que posee una batería de solo 1,56 [kWh] de capacidad

En cuanto al Hyundai Ioniq eléctrico, este se puede ver en la Figura 2.1, este vehículo al igual que sus versiones híbridas posee una longitud de 4.470 [mm], ancho de 1.820 [mm], alto de 1.475 [mm] y distancia entre ejes de 2.700 [mm]. Además, esta equipado con una batería con una capacidad de 28 [kWh] y cuenta con un puerto de carga rápida y un puerto de carga tipo 2.

En la Figura 2.1 que se muestra a continuación se puede ver el modelo de Hyundai Ioniq con el que se trabajará. Las especificaciones técnicas completas de este modelo se pueden encontrar en el Anexo A.



Figura 2.1: Hyundai Ioniq eléctrico.

## 2.3. Modelo de referencia

Para la confección del modelo de estimaciones que se presentará en el Capítulo 4, se utilizó literatura especializada en el tema, en especial se utilizó la publicación de Ivan Cvok, Branlmir Skugor y Josko Deur del año 2020 titulada "Control trajectory optimisation and optimal control of an electric vehicle HVAC system for favourable efficiency and thermal comfort".

Esta publicación expone un modelo simple, el cual toma en cuenta elementos como las características físicas de la cabina, radiación del sol, la temperatura ambiente, la convección con el medio ambiente, la temperatura de la cabina, el calor metabólico emanado por los ocupantes, la velocidad del vehículo y la carga del sistema de climatización.

Este modelo expuesto es una aproximación genérica para los vehículos y tiene espacio para ser complementado y adaptado específicamente a un auto en específico. Dicho modelo se puede ver a continuación en la Figura 2.2.

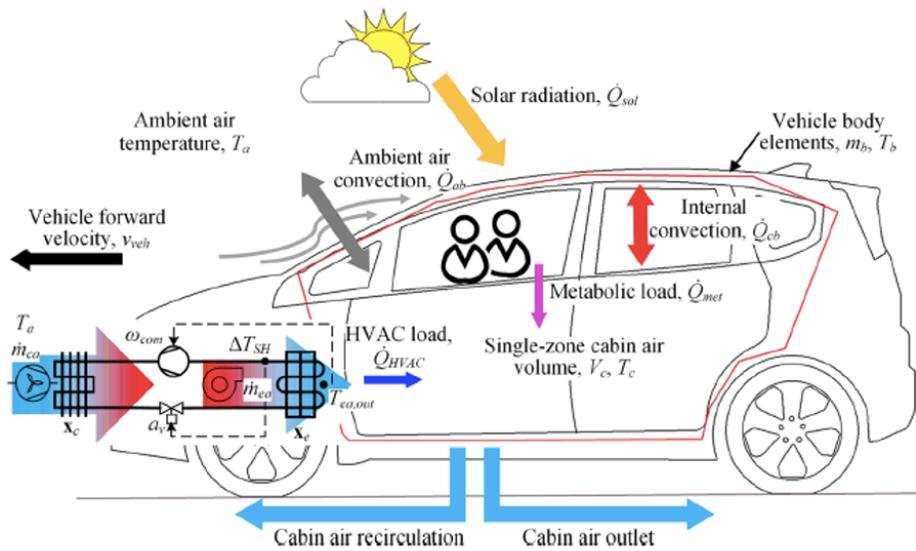


Figura 2.2: Modelo expuesto en publicación de Cvok, Skugor y Deur.

En este mismo paper se exponen ciertos parámetros de funcionamiento del sistema de climatización tales como las temperaturas de salida posibles del sistema, las flujos máxicos de aire posibles, las revoluciones posibles de los ventiladores y los coeficientes de performance (COP) de cada configuración. Estos parámetros se pueden ver en la Figura 2.3.

Los valores de funcionamiento propuestos por los autores serán útiles para calcular las cargas del sistema de aire acondicionado y calefacción, debido a que entregan los datos del flujo máxico de aire que ingresa a la cabina, con su temperatura correspondiente y con las revoluciones de los ventiladores correspondientes. Esto hace que sea posibles configurar estos sistemas con parámetros probables, con el fin de tener una exactitud mayor en los resultados finales.

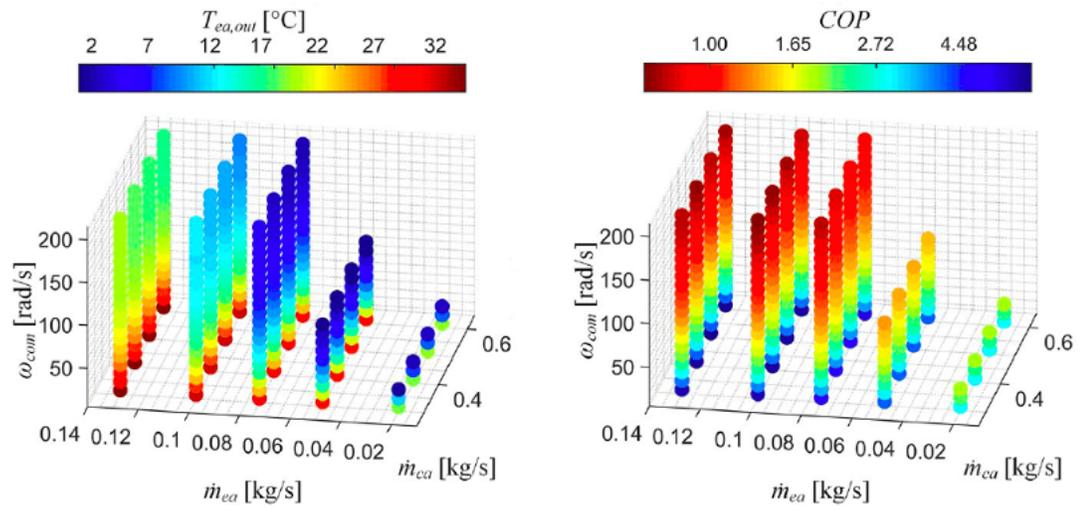


Figura 2.3: Parámetros de funcionamiento del sistema de climatización según publicación de Cvok, Skugor y Deur.

# Capítulo 3

## Metodología

Para el desarrollo de este trabajo de título se siguió una metodología lineal, en la que cada etapa debe al menos haber sido comenzada para avanzar a la siguiente. Esta línea de etapas se puede ver en la Figura 3.1.

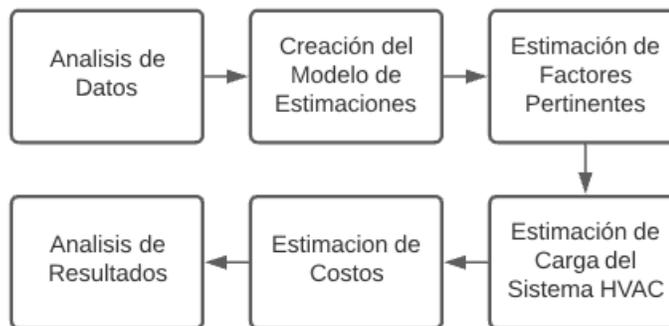


Figura 3.1: Metodología a seguir.

El trabajo comienza con el análisis de los datos recopilados y sigue con la creación del modelo de estimaciones, la estimación de los factores que afectan las transferencias de calor, la estimación de carga del sistema HVAC, la estimación de costos, el análisis de resultados y por último la conclusión del estudio. Cada una de estas etapas será explicada a continuación.

### 3.1. Análisis de datos

En esta etapa lo primero que se deben hacer es ver los datos que se recabaron de la flota para así identificar los parámetros importantes y que se podrán utilizar en el modelo que se creará más adelante. Con esto se puede identificar que los datos importantes para este trabajo son la fecha y hora de cada dato, las coordenadas geográficas, la altitud, los parámetros de funcionamiento de la batería tales como voltaje, corriente, potencia y estado de carga o "state of charge". Además, son importantes los datos de uso de los puertos de carga normal y rápida.

Lo siguiente es aplicar el filtro sobre los viajes que se tienen, como se mencionó en los alcances, solo se analizará un vehículo por mes y este debe cumplir con que realizó al menos dos viajes en un mes entre las 8:00 y las 20:00 horas. Cada uno de estos viajes debe haber sido de al menos 10 kilómetros de distancia.

Con esto se descartan viajes de trayectos cortos que pueden afectar a los resultados ya que el sistema de climatización no logrará llegar a la temperatura de confort de 20 [C] y esto hará que el resultado del consumo por el sistema HVAC sea un porcentaje mayor del consumo global del vehículo alterando la estadística con un viaje no representativo del uso de cada taxi.

Después de aplicar estos filtros se posee un universo de vehículos en cada mes que cumplen con este, lo siguiente es identificar errores en los datos. Esto debido a que se pudo identificar errores en los valores del estado de carga y potencia de la batería en algunos vehículos, esto hace que el universo de vehículos aptos para aplicar en un modelo se reduzca.

Por esto ultimo no es posible analizar un mismo vehículo a lo largo de los meses, sino que se utiliza un vehículo para los meses de enero y febrero, otro vehículo para los meses de marzo y abril, y por ultimo un tercer vehículo para el mes de mayo.

Finalmente, de los vehículos seleccionados, se busca un horario en el cual la mayoría haya realizado un viaje para poder realizar un análisis de mayor profundidad sobre los consumos y costos asociados al sistema de climatización.

## 3.2. Creación del modelo de estimaciones

Para poder estimar de forma correcta la carga del sistema de climatización se debe crear un modelo de estimaciones, el cual debe tomar en cuenta tanto los datos recopilados por telemetría, como los parámetros propios del Hyundai Ioniq como dimensiones, volumen de la cabina, materiales y espesor de materiales.

A modo de hacer que este modelo se acerque a la realidad, se diferenciará entre superficies como metales y vidrios que puede tener la cabina. Por esto se calcularon las superficies totales correspondientes a metales y vidrios, además del volumen aproximado que debe tener la cabina.

Dentro de los factores que se consideran para las transferencias de calor, se encuentran la radiación del sol, la temperatura ambiente, la velocidad del vehículo, el calor que los ocupantes le entregan a la cabina y el comportamiento que tienen las distintas superficies ante estos flujos de calores.

Este modelo de estimaciones se confecciona para saber la carga del sistema de climatización ( $\dot{Q}_{HVAC}$ ) en cada intervalo de tiempo. En el Capitulo 4 se ahondará en el planteamiento del modelo, junto con sus condiciones de borde y estimaciones pertinentes.

### 3.3. Estimación de factores pertinentes

Para poder calcular de forma correcta las transferencias de calor que van a existir entre la cabina del vehículo y el exterior es necesario tener ciertos parámetros adicionales que no se encuentran dentro de los datos recopilados.

El primero de estos factores es la temperatura ambiente a la que está sometido el vehículo en cada momento del día. Para estimar estas temperaturas se utilizó el explorador solar para acceder a los datos de temperatura promedio por hora en cada mes del año. Ya que se sabe la fecha y hora de cada dato, se le pudo agregar la temperatura ambiente a cada uno mediante herramientas de Microsoft Excel.

De esta misma forma, también se pudo incorporar a los datos una estimación de la radiación solar a la que está expuesto el vehículo en cada momento del día. Del explorador solar se obtuvo la radiación directa y difusa para cada hora del día en cada mes del año, con esto se estimó la radiación a la que estuvo expuesto el vehículo es un promedio de estas dos. Dichas estimaciones de radiación solar y temperatura ambiente se pueden encontrar en las Tablas .2 y .3 en el Anexo B.

Por otro lado, también se estimaron las dimensiones físicas de la cabina, esto se realizó mediante un modelo CAD en el cual se modeló la cabina del Hyundai Ioniq a escala mediante el uso de fotos de referencia de su cara delantera, trasera y lateral. Estas imágenes fueron puestas a escala con el uso de la distancia entre ejes del vehículo, distancia que sirvió para escalar las imágenes de forma correcta para luego crear el modelo. Este modelo se puede ver en el Anexo C junto con los resultados de las dimensiones de la cabina.

Por otro lado, existen dimensiones que se estimaron a partir de vehículos similares al Hyundai Ioniq, como lo son el espesor de los vidrios (5 [mm]), el espesor de la carrocería (4 [mm]) y el espesor promedio del material aislante de la cabina (7 [cm]).

### 3.4. Estimación de carga del sistema HVAC

El modelo de estimaciones entrega como resultado la carga de el sistema de climatización ( $\dot{Q}_{HVAC}$ ) para cada intervalo de tiempo. Este  $\dot{Q}_{HVAC}$  puede tener valores positivos en el caso de que este calentando la cabina y negativos en el caso de que este enfriando la cabina.

Dado esto para estimar la carga del sistema HVAC en un viaje se debe utilizar una suma de Riemman sobre los valores absolutos de  $\dot{Q}_{HVAC}$  utilizando como instante inicial aquel en el cual se comienza el viaje y final aquel en que se termina el viaje. Esto permite estimar la energía utilizada por el sistema HVAC a lo largo de todo el viaje.

Además, dado que se poseen los estados de carga de cada instante, se puede estimar el consumo total del vehículo mediante la diferencia entre los estados de carga al inicio y al final del viaje. Esto dará como resultado el porcentaje de la batería que se utilizó en dicho viaje.

Como se sabe que la batería del Hyundai Ioniq es de 38.1 kWh, se puede obtener la energía total utilizada en el viaje. Al dividir la energía utilizada por el sistema de climatización en la energía total utilizada se puede obtener cual es el porcentaje de energía que fue utilizado para climatizar la cabina.

Bajo esta misma línea, si se dividen los kilómetros recorridos de un viaje por la energía utilizada por el sistema de climatización en dicho viaje, se puede obtener la eficiencia del trayecto (km/kWh).

Al juntarse todos los viajes de un mismo mes y promediar sus utilizations de energía se pueden obtener estos resultados para todo el mes.

### 3.5. Estimación de costos

Los costos que conlleve mantener climatizada la cabina del vehículo serán calculados en base a seis tarifas disponibles en el mercado. Estas son la tarifa de Enel X en sus cargadores públicos de carga rápida y normal, Copec Voltex en sus cargadores de carga rápida y normal y Enel considerando tarifas BT1 y BT4.3. En el caso de la tarifa BT4.3 se contabiliza el kWh utilizado.

Estas tarifas se encuentran en costo por energía ( $\$/kWh$ ), dado que en la estimación de las cargas del sistema de climatización se obtuvo resultados de energía consumida por kilometro recorrido, se puede obtener un costo por kilometro recorrido en cada mes con cada tarifa.

Las tarifas utilizadas se pueden ver en la Tabla 3.1. Estas fueron calculadas en base a un promedio de los precios de los proveedores en las comunas de La Granja, La Florida, Las Condes y Santiago Centro, debido a que estas fueron las comunas en las que los vehículos recargaron con mayor frecuencia.

Tabla 3.1: Tarifas de energía según proveedores principales (IVA incluido).

Fuente de Energía	$C_{\$/kWh}$ [ $\$/kWh$ ]
Copec Voltex CCS (50kW)	250
Copec Voltex Tipo 2 (43kW)	161
Enel X CCS (60kW)	230
Enel X Tipo 2 (28kW)	210
Enel BT1	120
Enel BT4.3	89

### 3.6. Análisis de resultados

Con los resultado de los consumos energéticos del sistema de climatización y de los costos que tiene este mismo para climatizar la cabina entre las 8:00 y 20:00 horas al mes, se puede comenzar a analizar el comportamiento de los resultados.

Lo primero es hacer un análisis sobre su evolución en los distintos meses, fijándose en como cambian los datos de consumo a medida que cambian los parámetros más importantes como las temperaturas ambiente y la radiación solar a las que esta sometida el vehículo en cuestión.

Luego se sigue por analizar los resultado de viajes que tuvieron lugar entre las 14:30 y las 16:30 horas, esta vez contrastando los datos de consumo de estos viajes con la distancia recorrida por los mismos y la temperatura ambiente promedio a la que se ve sometido el vehículo. Esto es importante para analizar como se ve afectada la eficiencia global del sistema de climatización con lo largo de un viaje y con los cambios en temperatura ambiente.

Estos análisis tendrán el fin de dar un mejor entendimiento de los costos que conlleva climatizar la cabina a lo largo del año y según la eficiencia del viaje.

# Capítulo 4

## Modelo de estimaciones

Basándose en el modelo de Cvok del 2020 se adaptó un modelo de estimación de la carga del sistema de climatización que es capaz de diferenciar entre las distintas superficies de la cabina con el fin de obtener resultados más confiables y certeros al calcular las cargas del sistema de HVAC.

Además, este modelo de estimaciones toma en cuenta la variación de la temperatura de la carrocería y de la cabina en el tiempo para así obtener un calculo que se adapte a medida que transcurra el tiempo de viaje. El esquema de este modelo de estimaciones se encuentra a continuación en la Figura 4.1.

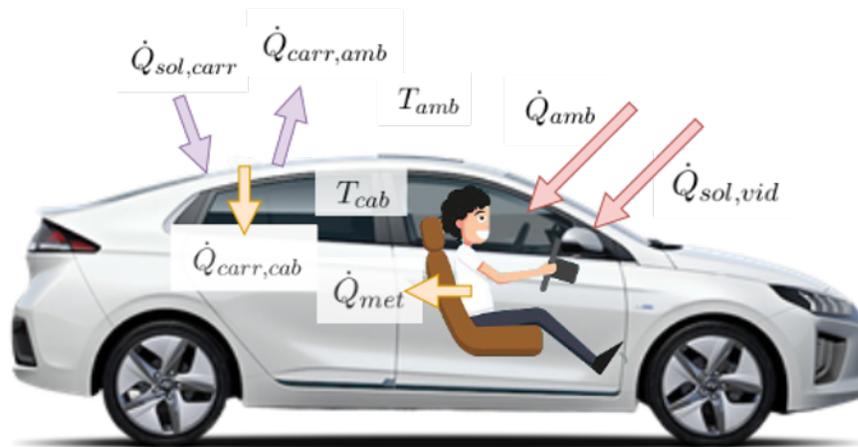


Figura 4.1: Esquema del modelo de estimaciones de carga de sistema HVAC.

Como se puede ver en el esquema, las transferencias de calor que se toman en cuenta son la que ocurre entre el sol y la carrocería ( $\dot{Q}_{sol,carr}$ ), entre la carrocería y el medio ambiente ( $\dot{Q}_{carr,amb}$ ), entre la carrocería y la cabina ( $\dot{Q}_{carr,cab}$ ), entre el medio ambiente y la cabina ( $\dot{Q}_{amb,cab}$ ), desde el sol a la cabina a través de los vidrios ( $\dot{Q}_{sol,cab}$ ). Además se toma en cuenta el calor metabólico que los pasajeros le traspan a la cabina ( $\dot{Q}_{met}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) junto con la temperatura de la cabina ( $T_{cab}$ ).

A continuación se explicará de forma detallada cada una de estas transferencias de calor y como varían las temperaturas en el tiempo.

## 4.1. Parámetros que calcula el modelo

### 4.1.1. Flujo de calor desde el sol y la carrocería en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{sol,carr,i}$ )

El flujo de calor entre el sol y la carrocería se debe tener en cuenta dado que el sol por si mismo no calentará la cabina, sino que calentará la carrocería, la cual posteriormente intercambiará calor con el medio ambiente y la cabina.

Este flujo de calor está regido por la Ecuación 4.1 que se puede ver a continuación:

$$\dot{Q}_{sol,carr,i} = \dot{q}_{sol,i} \cdot A_{carr} \cdot A_{\%afectado,carr} \quad (4.1)$$

En donde  $\dot{q}_{sol}$  es la radiación del sol por unidad de área y se encuentra en Watts por metro al cuadrado [ $W/m^2$ ], y por otro lado  $A_{carr}$  es la superficie de la carrocería del vehículo en metro al cuadrado [ $m^2$ ]. Esta superficie esta multiplicada por el factor  $A_{\%afectado,carr}$  que es el área de la carrocería afectada por la radiación solar en relación al total del área.

Este factor es igual a 0,53 y se calculó en base al promedio simple del porcentaje de la carrocería expuesta al sol cuando este le llega desde un ángulo isométrico delantero izquierdo, delantero derecho, trasero izquierdo, trasero derecho y cuando le llega desde un ángulo superior al lado derecho, lado izquierdo al frontal y a la parte trasera del vehículo.

Se utiliza un promedio simple dada la dificultad de asignarle una predominancia a algún ángulo de exposición al sol. Por lo tanto, para hacer que sea lo más equitativo posible, se escoge un promedio simple donde todo ángulo de exposición tenga la misma probabilidad de ocurrencia.

Con esto, al multiplicar los tres parámetros se obtiene que finalmente  $\dot{Q}_{sol,carr,i}$  se encuentra en Watts [W].

### 4.1.2. Flujo de calor entre carrocería y medio ambiente en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{carr,amb,i}$ )

Este flujo calorífico ocurre mediante convección natural en el caso que el vehículo se encuentre detenido y mediante convección forzada en caso de que este se encuentre en movimiento.

Este flujo dependerá de la superficie de la carrocería sobre la cual exista flujo de calor, para esta aplicación se asume que toda la carrocería esta a una misma temperatura transfiriendo la misma cantidad de calor. Además, dependerá de la diferencia de temperatura que haya existido entre el medio ambiente y la carrocería en el instante anterior de los datos y de el coeficiente de convección del momento.

Con esto, este flujo de calor está regido por la Ecuación 4.2 que se puede ver a continuación:

$$\dot{Q}_{carr,amb,i} = \bar{h}(v) \cdot A_{carr} \cdot (T_{amb,i} - T_{carr,i}) \quad (4.2)$$

En donde  $A_{carr}$  es la superficie de la carrocería [ $m^2$ ],  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente del instante [ $C$ ],  $T_{carr}$  es la temperatura de la carrocería en el instante [ $C$ ] y  $\bar{h}(v)$  es el coeficiente convectivo medio [ $W/m^2K$ ] para una placa plana con flujo completamente turbulento y número de Reynolds menor a 10 millones.

Este coeficiente convectivo se rige por la ecuación 4.3 (Bahrami, 2015) que se encuentra a continuación:

$$\bar{h}(v) = \frac{k_{aire}}{L} \cdot 0.037 \cdot Re_v^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \quad (4.3)$$

En donde  $k_{aire}$  es la conductividad térmica del aire, L es el largo de la cabina,  $Re_v$  es el número de Reynolds según la velocidad a la que viaja el vehículo y Pr es el número de Prandtl. Además, en caso de que el vehículo se encuentre detenido el coeficiente de convección se fijó en 10 [ $W/m^2K$ ]. Los valores para  $k_{aire}$  y L se encuentran en la Tabla 4.1.

Las formulas utilizadas para los números adimensionales se pueden ver a continuación en las ecuaciones 4.4 y 4.5. que se muestran a continuación.

$$Re_v = \frac{\rho \cdot V_i \cdot L}{\mu} \quad (4.4)$$

$$Pr = \frac{C \cdot \mu}{k} \quad (4.5)$$

En donde  $\rho$  es la densidad del aire, V es la velocidad a la que viaje el vehículo [ $m/s$ ], L es el largo de la cabina, C es el calor específico del aire y  $\mu$  es la viscosidad del aire. Estos parámetros se pueden encontrar en la Tabla 4.1 que se muestra a continuación.

Tabla 4.1: Parámetros del aire y cabina.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Coefficiente de conductividad térmica del aire	$k_{aire}$	W/mK	0,02
Densidad del aire	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1,29
Calor específico del aire	C	J/kgK	1012
Viscosidad del aire	$\mu$	kg/ms	0,0000185
Largo de la placa	L	m	3,5
Superficie de la carrocería	$A_{carr}$	m <sup>2</sup>	-

### 4.1.3. Flujo de calor entre carrocería y cabina en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{carr,cab,i}$ )

Así como la carrocería le transfiere calor al medio ambiente, también le transfiere calor a la cabina, para hacerlo este calor debe pasar por el espesor de la carrocería y por el aislante de la cabina hacia esta. Dicho esto, la formula que rige el flujo de calor entre la carrocería y la cabina se puede ver en la ecuación 4.6.

$$\dot{Q}_{carr,cab,i} = \frac{(T_{carr,i} - T_{cab,i})}{(R_1 + R_2 + R_3)} \quad (4.6)$$

En donde  $T_{carr,i}$  es la temperatura exterior de la carrocería en grados Celsius y  $T_{cab,i}$  es la temperatura de cabina en grados Celsius. Por otro lado  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  corresponden a la resistencia por conducción del aluminio, la resistencia por conducción del aislante y la resistencia por convección de la cabina respectivamente. Estas resistencias se pueden ver en las ecuaciones 4.7, 4.8 y 4.9.

$$R1 = \frac{L_{al}}{k_{al} \cdot A_{carr}} \quad (4.7)$$

$$R2 = \frac{L_{ai}}{k_{ai} \cdot A_{carr}} \quad (4.8)$$

$$R3 = \frac{1}{h_{cab} \cdot A_{carr}} \quad (4.9)$$

En donde  $L_{al}$  es el espesor promedio del aluminio de la carrocería,  $k_{al}$  es el coeficiente de conducción del aluminio,  $L_{ai}$  es el espesor promedio del aislante de la cabina,  $k_{ai}$  es el coeficiente de conducción del aislante,  $h_{cab}$  es el coeficiente convectivo de la cabina y por último  $A_{carr}$  es la superficie de metales de la cabina. Estos valores se pueden ver en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros de la cabina y carrocería.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Espesor promedio del aluminio	$L_{al}$	mm	4
Coefficiente de conducción del aluminio	$k_{al}$	W/mK	209,3
Espesor promedio del aislante de la cabina	$L_{ai}$	cm	7
Coefficiente de conducción del aislante	$k_{ai}$	W/mK	0,05
Coefficiente convectivo de la cabina	$h_{cab}$	W/m <sup>2</sup> K	10
Superficie de metales de la cabina	$A_{carr}$	m <sup>2</sup>	-

#### 4.1.4. Temperatura de la carrocería en un instante de tiempo ( $T_{carr,i}$ )

La temperatura de la carrocería variará en el tiempo dependiendo de los flujos de calor a los cuales esté sometida. Este flujo de calor estará dado por el calor que le entregó el sol a la carrocería en el instante anterior, el calor que se transfirió entre esta y el medio ambiente en el instante anterior, y el calor que se transfirió entre esta y la cabina en el instante anterior.

La temperatura de la carrocería también depende de la temperatura de la cabina en el instante anterior, de la diferencia de tiempo entre el instante actual y el anterior, del volumen, densidad y calor específico de la carrocería.

La formula mediante la cual se puede obtener la temperatura actual de la carrocería se encuentra a continuación en la ecuación 4.10.

$$T_{carr,i} = T_{carr,i-1} + \frac{(\dot{Q}_{sol,carr,i-1} - \dot{Q}_{carr,amb,i-1} - \dot{Q}_{carr,cab,i-1}) \cdot \Delta t}{v_{carr} \cdot \rho_{carr} \cdot C_{carr}} \quad (4.10)$$

En donde  $T_{carr,i-1}$  es la temperatura de la cabina en el instante anterior [C],  $\dot{Q}_{sol,carr,i-1}$  es el calor que le entregó el sol a la carrocería en el instante anterior [W],  $\dot{Q}_{carr,amb,i-1}$  es el calor que se transfirió entre la carrocería y el medio ambiente en el instante anterior [W],  $\dot{Q}_{carr,cab,i-1}$  es el calor que se transfirió entre esta y la cabina en el instante anterior [W],  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido entre un instante y otro en horas [h],  $v_{carr}$  es el volumen de la carrocería en metros cúbicos [m<sup>3</sup>],  $\rho_{carr}$  es la densidad de la carrocería y  $C_{carr}$  es el calor específico de la carrocería. Algunos de los valores de estos parámetros se pueden encontrar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros de la carrocería.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Densidad de la carrocería	$\rho_{carr}$	kg/m <sup>3</sup>	2700
Calor específico de la carrocería	$C_{carr}$	kWh/kgK	0.000249

Además, se define que cuando el vehículo lleva más de 30 minutos apagado la temperatura de la carrocería será 2,5 veces la temperatura ambiente.

#### 4.1.5. Flujo de calor entre el medio ambiente y la cabina en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{amb,cab,i}$ )

El medio ambiente y la cabina intercambiarán calor por medio de los vidrios del vehículo, esta transferencia estará dada por la ecuación 4.11, la cual se muestra a continuación.

$$\dot{Q}_{amb,cab,i} = \frac{(T_{amb,i} - T_{cab,i})}{(R_4 + R_5 + R_6)} \quad (4.11)$$

Donde ( $T_{amb,i}$  es la temperatura ambiente en Celsius y ( $T_{cab,i}$  es la temperatura de la cabina en Celsius. Además,  $R_4$ ,  $R_5$  y  $R_6$  corresponden a la resistencia por convección del medio ambiente, la resistencia por conducción del aluminio y la resistencia por convección de la cabina. Estas resistencias se muestran en las ecuaciones 4.12, 4.13 y 4.14 a continuación.

$$R4 = \frac{1}{\bar{h}(v) \cdot A_{vid}} \quad (4.12)$$

$$R5 = \frac{L_{vid}}{k_{vid} \cdot A_{vid}} \quad (4.13)$$

$$R6 = \frac{1}{h_{cab} \cdot A_{vid}} \quad (4.14)$$

En donde  $\bar{h}(v)$  es la convección del medio ambiente expuesta anteriormente,  $A_{vid}$  es el área que cubren los vidrios en metros cuadrados,  $L_{vid}$  es el espesor de los vidrios,  $k_{vid}$  es el coeficiente de conductividad térmica del vidrio y  $h_{cab}$  es el coeficiente de convección de la cabina expuesto anteriormente. Los valores de resistencia para algunos de estos datos se pueden encontrar a continuación en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Parámetros de los vidrios de la cabina.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Espesor de los vidrios	$L_{vid}$	$mm$	5
Coficiente de conductividad térmica del vidrio	$k_{vid}$	$W/mK$	0,6-1

#### 4.1.6. Flujo de calor desde el sol a la cabina en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{sol,cab,i}$ )

De la misma forma en la que el sol puede entregarle calor a la carrocería, este puede entregarle calor a la cabina a través de las ventanas. Para este caso se asume que los vidrios del vehículo no cuentan con polarizado y por lo tanto dejan entrar toda la radiación del sol.

Por esto la fórmula que rige el calor que el sol le entrega a la cabina está dada por la

ecuación 4.15 que se muestra a continuación.

$$\dot{Q}_{sol,cab,i} = \dot{q}_{sol,i} \cdot A_{vid} \cdot A_{\%afectado,vid} \quad (4.15)$$

En donde  $\dot{q}_{sol,i}$  es la radiación del sol por unidad de área y  $A_{vid}$  es el área de las ventanas del vehículo, Al igual que en la sección 4.1.1 esta superficie esta multiplicada por el factor  $A_{\%afectado,vid}$  que es el área de los vidrios afectada por la radiación solar en relación al total del área.

Este factor es igual a 0,77 y se calculó en base al promedio simple del porcentaje de vidrios expuestos al sol cuando este le llega desde un ángulo isométrico delantero izquierdo, delantero derecho, trasero izquierdo, trasero derecho y cuando le llega desde un ángulo superior al lado derecho, lado izquierdo al frontal y a la parte trasera del vehículo.

Se utiliza un promedio simple por la misma razón explicada en la sección 4.1.1, dada la dificultad de asignarle una predominancia a algún ángulo de exposición al sol, y por lo tanto, para hacer que sea lo más equitativo posible, se escoge un promedio simple donde todo ángulo de exposición tenga la misma probabilidad de ocurrencia.

#### 4.1.7. Flujo de calor metabólico ( $\dot{Q}_{met}$ )

Este flujo de calor corresponde al calor que los mismos pasajeros del vehículo le entregan a la cabina, solo se toma en cuenta cuando la temperatura de la cabina es menor a 36[C]. Esto debido a que la temperatura corporal del ser humano es de 36[C] por lo que si la cabina está a mayor temperatura, esta le entrega calor al ser humano y por otro lado si esta está a menor temperatura el ser humano le entregará calor a la cabina.

Este calor dependerá de la formula en la ecuación 4.16 que se muestra a continuación.

$$\dot{Q}_{met} = \dot{q}_{persona} \cdot A_{persona} \cdot N_{personas} \quad (4.16)$$

Donde  $\dot{q}_{persona}$  es el calor irradiado por una persona por unidad de área [ $W/m^2$ ],  $A_{persona}$  es el área de una persona [ $m^2$ ] y  $N_{personas}$  es el numero de pasajeros en el vehículo.

Se asume que los pasajeros se suben al vehículo después de haber caminado por el aeropuerto, lo cual se considera como actividad ligera y por lo tanto se tiene que  $\dot{q}_{persona}$  será de 93 [ $W/m^2$ ](Olesen, 2001). Además una persona promedio tiene una superficie de 1.8 [ $m^2$ ](Olesen, 2001), por lo que el calor metabólico de una persona será de 167,4 [W].

Dado que no se poseen datos sobre la cantidad de pasajeros que lleva el vehículo en cada instante se asumirá que el vehículo lleva en todo momento al conductor junto con un pasajero

adicional, por lo que el calor metabólico será de 334.8 [W] en todo momento.

#### 4.1.8. Flujo de calor total en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{tot,i}$ )

Con todos los flujos de calor calculados, se debe sumar aquellos flujos que intervienen con la cabina del vehículo para así obtener el flujo de calor total que entra o sale de la cabina en cada instante.

Dicho esto el flujo de calor total estará dado por la suma de el flujo de calor entre la carrocería y la cabina, el flujo de calor entre el medio ambiente y la cabina, el flujo de calor desde el sol a la cabina y el flujo de calor metabólico existente. Esta suma se puede ver en la ecuación 4.17 la cual entregará el  $\dot{Q}_{tot,i}$  en Watts.

$$\dot{Q}_{tot,i} = \dot{Q}_{carr,cab,i} + \dot{Q}_{amb,cab,i} + \dot{Q}_{met} + \dot{Q}_{sol,cab,i} \quad (4.17)$$

#### 4.1.9. Carga del sistema de climatización en un instante de tiempo ( $\dot{Q}_{HVAC,i}$ )

El sistema de climatización de la cabina puede funcionar de tres formas, la primera es en enfriamiento, que actúa cuando la temperatura de la cabina es superior a 20 [C]. La segunda es en calefacción, que actúa cuando la temperatura es menor a 20 [C] y por ultimo la tercera es en mantención de temperatura cuando la temperatura de la cabina está en la temperatura de confort.

Esta carga depende de el flujo másico de aire, el calor específico del aire, y de la diferencia de temperaturas entre el aire que sale del sistema de climatización y el aire de la cabina. Esta formula se puede ver a continuación en la ecuación 4.18.

$$\dot{Q}_{HVAC,i} = \dot{m}_{ea} \cdot c_{p,ea} \cdot (T_{ea,out,i} - T_{cab,i}) \quad (4.18)$$

Donde  $\dot{m}_{ea}$  es el flujo másico de aire,  $c_{p,ea}$  es el calor específico del aire,  $T_{ea,out,i}$  es la temperatura de salida del sistema de climatización y  $T_{cab,i}$  es la temperatura de la cabina. En la Tabla 4.5 se pueden ver los valores utilizados con sus unidades.

Tabla 4.5: Parámetros de funcionamiento sistema HVAC.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Flujo másico de aire	$\dot{m}_{ea}$	kg/s	0.04
Calor específico del aire	$c_{p,ea}$	J/kgK	1006
Temperatura aire de salida enfriamiento	$T_{ea,out}$	C	15
Temperatura aire de salida calentamiento	$T_{ea,out}$	C	32

Estos valores fueron extraídos del paper de Cvok del año 2020.

#### 4.1.10. Temperatura de la cabina en un instante de tiempo ( $T_{cab,i}$ )

Al igual que la temperatura de la carrocería, la temperatura de la cabina varia conforme pasa el tiempo, la temperatura de la cabina estará dada por la temperatura de la cabina en el instante anterior, la carga del sistema HVAC y el flujo de calor total en la cabina. Además del intervalo de tiempo transcurrido, el volumen de aire en la cabina, la densidad del aire y el calor específico de este.

Con esto la formula de la temperatura de la cabina se puede ver a continuación en la ecuación 4.19.

$$T_{cab,i} = T_{cab,i-1} + \frac{(\dot{Q}_{HVAC,i-1} + \dot{Q}_{tot,i-1}) \cdot \Delta t}{v_{aire} \cdot \rho_{aire} \cdot C_{aire}} \quad (4.19)$$

Donde  $T_{cab,i}$  es la temperatura de la cabina en el instante actual [C],  $T_{cab,i-1}$  es la temperatura de la cabina en el instante anterior [C],  $\dot{Q}_{HVAC,i-1}$  carga del sistema HVAC en el instante anterior,  $\dot{Q}_{tot,i-1}$  es el flujo total de calores en el instante anterior,  $v_{aire}$  es el volumen de aire en la cabina contabilizando el volumen que utilizan dos pasajeros,  $\rho_{aire}$  es la densidad del aire y  $C_{aire}$  es el calor específico del aire. Los valores de estos tres parámetros se pueden encontrar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Parámetros del aire en la cabina.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Volumen de aire	$v_{aire}$	$m^3$	2,11
Densidad del aire	$\rho_{aire}$	$kg/m^3$	1,29
Calor específico del aire	$C_{aire}$	$kWh/kgK$	0,00028

Es importante señalar que debido a esta suma de calores ( $\dot{Q}_{HVAC,i-1} + \dot{Q}_{tot,i-1}$ ) se tienen los siguientes escenarios sobre como evolucionará la temperatura de la cabina dependiendo del valor de estos calores:

- Si  $\dot{Q}_{HVAC,i-1} = -\dot{Q}_{tot,i-1}$  la temperatura de la cabina se mantiene.
- Si  $\dot{Q}_{HVAC,i-1} + \dot{Q}_{tot,i-1} < 0$  la temperatura de la cabina desciende.
- Si  $\dot{Q}_{HVAC,i-1} + \dot{Q}_{tot,i-1} > 0$  la temperatura de la cabina aumenta.

En el caso de que el vehículo lleve más de 30 minutos apagado se asume una temperatura de la cabina de 1,5 veces la temperatura ambiente.

#### 4.1.11. Energía consumida por el sistema de climatización en un instante de tiempo ( $E_{HVAC,i}$ )

Con el valor absoluto de la carga del sistema HVAC calculada en cada instante, se puede calcular cuanta energía consume el sistema de climatización en el intervalo de tiempo correspondiente

$$E_{HVAC,i} = |\dot{Q}_{HVAC,i}| \cdot \Delta t \quad (4.20)$$

En donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en horas y  $\dot{Q}_{HVAC,i}$  es la carga del sistema de climatización en el mismo instante de tiempo en Watts.

#### 4.1.12. Distancia recorrida en un instante ( $D_i$ )

Dado que se poseen las coordenadas del vehículo en cada instante se puede calcular la distancia que se desplazó en entre estos momentos mediante la formula del semiverseno, la cual se muestra a continuación en la ecuación 4.21.

$$D_i = 2 \cdot r \cdot \arcsen\left(\sqrt{\sen^2\left(\frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{2}\right) + \cos(\phi_{i-1}) \cdot \cos(\phi_i) \sen^2\left(\frac{\lambda_i - \lambda_{i-1}}{2}\right)}\right) \quad (4.21)$$

En donde  $r$  es el radio promedio del planeta Tierra en kilómetros, el cual es 6371[km] aproximadamente,  $\phi_i$  y  $\phi_{i-1}$  son la latitud del instante actual y la latitud del instante anterior respectivamente y por último  $\lambda_i$  y  $\lambda_{i-1}$  son la longitud del instante actual y la longitud del instante anterior respectivamente. Esto permite obtener la distancia recorrida entre estos dos instantes en kilómetros.

## 4.2. Calculo de resultados

### 4.2.1. Energía total utilizada por el vehículo $E_{tot}$

Para calcular la energía total utilizada por el vehículo en un viaje se utilizará la diferencia entre el State of Charge del comienzo del viaje y del final del viaje. Esto entregará aproximado del porcentaje de la batería utilizado en el viaje, lo cual al multiplicarse por la capacidad de la batería da como resultado la energía consumida en la totalidad del trayecto. El calculo de esta energía se puede ver en la ecuación 4.22 que se muestra a continuación.

$$E_{tot} = (SOC_0 - SOC_f) \cdot CB \quad (4.22)$$

En donde  $SOC_0$  y  $SOC_f$  corresponden a los State of Charge porcentuales al comienzo y al término del viaje respectivamente y CB corresponde a la capacidad de la batería, que en el caso del Hyundai Ioniq, esta capacidad es de 28 [kWh].

#### 4.2.2. Energía total utilizada por el sistema HVAC ( $E_{HVAC,tot}$ )

Con la información de la energía consumida por el sistema de climatización en cada intervalo de tiempo durante un trayecto se puede calcular la energía total utilizada por el sistema HVAC mediante la sumatoria de estas energías desde el intervalo en el cual comienza el viaje ( $i=0$ ) hasta el intervalo en el cual termina el viaje ( $i=f$ ).

Con esto la energía total consumida por el sistema de climatización se puede calcular mediante la formula expuesta a continuación en la ecuación 4.23.

$$E_{HVAC,tot} = \sum_{i=0}^f E_{HVAC,i} \quad (4.23)$$

#### 4.2.3. Distancia total recorrida por el vehículo ( $D_{tot}$ )

De la misma forma que se calculó la energía total utilizada por el sistema HVAC se puede calcular la distancia total recorrida por el vehículo, esto mediante la sumatoria de las distancias recorridas en cada intervalo de tiempo desde que comienza el viaje ( $i=0$ ) hasta que termina este ( $i=f$ ).

De esta forma la distancia total recorrida en el trayecto se puede calcular por la formula de la ecuación 4.24 que se muestra a continuación.

$$D_{tot} = \sum_{i=0}^f D_i \quad (4.24)$$

#### 4.2.4. Tiempo total transcurrido en el trayecto ( $t_{tot}$ )

El tiempo total transcurrido en el trayecto se obtendrá mediante la diferencia entre el tiempo de termino del trayecto ( $t_f$ ) y el tiempo de inicio del trayecto ( $t_0$ ). El resultado se considerará en horas y es calculado por Microsoft Excel según se tenga configurado.

#### 4.2.5. Relación de consumo sistema HVAC ( $\%_{HVAC}$ )

Esta relación corresponde a el porcentaje de energía consumida por el vehículo que se utilizó en el sistema de climatización, este resultado depende de la energía total consumida por el sistema de climatización y de la energía total consumida por el vehículo y su formula

se puede encontrar en la ecuación 4.25.

$$\%_{HVAC} = \frac{E_{HVAC,tot}}{E_{tot}} \cdot 100 \quad (4.25)$$

#### 4.2.6. Eficiencia del sistema HVAC ( $C_{km/kWh}$ )

Este indicador es importante dado que entrega la eficiencia del sistema de climatización de un viaje. Esto permite tener una mejor idea de como es el consumo del sistema, dado que mientras mayor sea el resultado de este indicador, menor es el consumo energético del sistema HVAC. La formula de este indicador se puede encontrar a continuación en la ecuación 4.26.

$$C_{km/kWh} = \frac{D_{tot}}{E_{HVAC,tot}} \quad (4.26)$$

#### 4.2.7. Costo de climatización por kilometro ( $C_{\$/km}$ )

Este indicador es el más importante para poder visualizar la diferencia en los costos por climatización de la cabina a lo largo del año. Se calcula utilizando el indicador de la energía consumida por kilometro y la tarifa de energía con la cual se quiera obtener un resultado. Este indicador se calcula mediante la ecuación 4.27 que se muestra a continuación.

$$C_{\$/km} = \frac{1}{C_{km/kWh}} \cdot C_{\$/kWh} \quad (4.27)$$

En donde  $C_{\$/kWh}$  es la tarifa de la energía suministrada, esta tarifa puede variar según el proveedor y el tipo de carga. En la Tabla 3.1 se muestran las tarifas de la energía para los proveedores principales en sus distintos tipos de carga, las cargas CCS se refieren a *Combined Charging System* y corresponden a cargas rápidas, las cargas tipo 2 corresponden por otro lado a carga lenta y en caso de no estar especificado también se considera carga lenta.

# Capítulo 5

## Resultados

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos tanto del consumo energético del sistema de climatización como del costo por climatización de la cabina.

### 5.1. Resultados de consumo energético por climatización de la cabina

Los viajes analizados en cada mes y sus respectivos resultados se pueden ver desde la Tabla 5.1 hasta la Tabla 5.5 en donde cada tabla corresponde a un mes en particular. Los viajes presentes en estas tablas son todos aquellos realizados entre las 8:00 y la 20:00 horas.

Tabla 5.1: Resultados de consumo mes de Enero.

Fecha	$E_{tot}[kWh]$	$E_{HVAC,tot}[kWh]$	$\%_{HVAC}[\%]$	$D_{tot}[km]$
20-01-20	4.06	1.82	44.9	43.0
21-01-20	3.92	0.80	20.4	38.0
26-01-20	6.44	2.55	39.7	53.6
27-01-20	9.38	3.54	37.7	95.5
28-01-20	6.72	2.40	35.7	72.0
29-01-20	9.24	3.66	39.6	72.9
31-01-20	1.68	0.45	26.8	12.3

Tabla 5.2: Resultados de consumo mes de Febrero.

Fecha	$E_{tot}[kWh]$	$E_{HVAC,tot}[kWh]$	$\%_{HVAC}[\%]$	$D_{tot}[km]$
01-02-20	5.46	2.52	46.13	37.26
05-02-20	2.10	0.67	32.10	12.92

Tabla 5.3: Resultados de consumo mes de Marzo.

Fecha	$E_{tot}[kWh]$	$E_{HVAC,tot}[kWh]$	$\%_{HVAC}[\%]$	$D_{tot}[km]$
23-03-20	4.34	1.88	43.36	23.15
26-03-20	9.94	1.10	11.04	84.18
27-03-20	3.92	1.75	44.68	27.65
31-03-20	2.80	0.48	17.17	18.41

Tabla 5.4: Resultados de consumo mes de Abril.

Fecha	$E_{tot}[kWh]$	$E_{HVAC,tot}[kWh]$	$\%_{HVAC}[\%]$	$D_{tot}[km]$
02-04-20	4.06	1.15	28.25	36.86
03-04-20	1.96	0.48	24.35	18.90
06-04-20	3.08	0.49	15.99	19.69
19-04-20	1.40	0.18	13.16	12.83
27-04-20	3.36	1.77	52.74	45.04

Tabla 5.5: Resultados de consumo mes de Mayo.

Fecha	$E_{tot}[kWh]$	$E_{HVAC,tot}[kWh]$	$\%_{HVAC}[\%]$	$D_{tot}[km]$
19-05-20	2.80	0.82	29.38	30.63
20-05-20	1.26	0.40	31.78	14.52

Con los resultados por día de los consumos se puede obtener una tabla de resumen de los valores de consumo para cada mes. Este resumen se puede ver a continuación en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Resumen de consumos energéticos.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
$D_{tot}$ del mes [km]	387.4	50.18	153.39	133.33	45.15
$E_{tot}$ del mes [kWh]	41.44	7.56	21.00	13.86	4.06
$E_{HVAC,tot}$ del mes [kWh]	15.22	3.19	5.21	4.07	1.22
$\%_{HVAC}$ promedio del mes [%]	36.73	42.23	24.81	29.39	30.12
$C_{km/kWh}$ promedio del mes [km/kWh]	25.453	15.715	29.435	32.734	36.917

En las Figuras 5.1 y 5.2 se puede ver de forma gráfica la variación de la eficiencia del sistema de climatización ( $C_{km/kWh}$ ) y la variación del porcentaje de la energía consumida por el sistema de climatización con respecto a la energía total consumida por el vehículo en cada mes ( $\%_{HVAC}$ ).

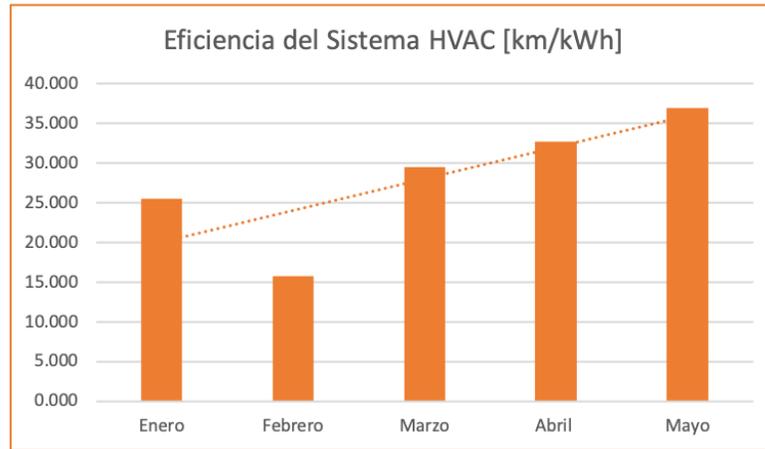


Figura 5.1: Evolución de la eficiencia energética del sistema HVAC en los distintos meses (horario de 8:00 a 20:00 horas).

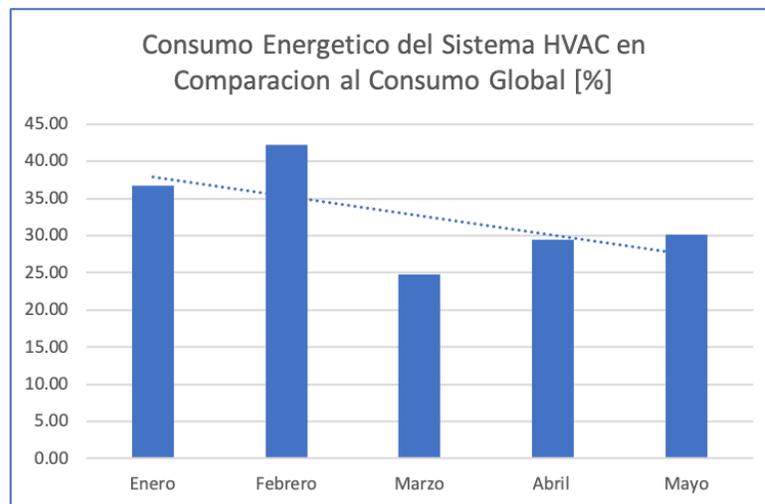


Figura 5.2: Evolución del consumo energético del sistema HVAC en relación al consumo global del vehículo en los distintos meses (horario de 8:00 a 20:00 horas).

Por otro lado, con el fin de poder analizar a mayor profundidad estos resultados se calculó un viaje por mes entre las 14:30 y las 16:30 horas aproximadamente. Estos cálculos contienen adicionalmente datos sobre las horas de inicio y término, la velocidad promedio del viaje y la temperatura y radiación solar promedio de este.

En la Tabla 5.7 se pueden ver los resultados de estos viajes específicos que tomaron lugar entre las 14:30 y 16:30 horas. El mes de Mayo no se encuentra presente debido a que no se realizó ningún viaje que cumpliera los requisitos en este horario en este mes.

Tabla 5.7: Resultados sobre viajes específicos entre las 14:30 y 16:30 horas.

Fecha	28 de Enero	1 de Febrero	23 de Marzo	3 de Abril
$E_{tot}[kWh]$	5.18	1.82	2.80	1.96
$E_{HVAC,tot}[kWh]$	1.79	1.00	0.80	0.48
$\%_{HVAC}[\%]$	34.65	54.74	28.42	24.35
$D_{tot}[km]$	61.15	12.98	18.14	18.90
Hora de Inicio	14:42:57	14:58:42	14:30:14	15:45:19
Hora de Termino	16:35:02	16:30:47	15:21:24	16:21:09
Horas	1.87	1.53	0.85	0.60
Velocidad Promedio [km/h]	32.73	8.46	21.27	31.65
$C_{km/kWh}[km/kWh]$	34.068	13.030	22.799	39.605
Temperatura Promedio [C]	28.61	28.07	26.66	22.35
Radiacion Solar Promedio [ $W/m^2$ ]	402.08	408.39	380.19	306.16

## 5.2. Resultado de costos por climatización de la cabina

Al cruzar los datos del consumo de energía del sistema de climatización por kilómetro con las tarifas que tiene la energía en cada una de las distintas fuentes se obtiene la información de la Tabla 5.8 que se ve a continuación.

Tabla 5.8: Costos por climatización en cada mes en CLP por kilómetro según las distintas tarifas (horario de 8:00 a 20:00 horas).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Copec Voltex CCS (50kW)	9.8	15.9	8.5	7.6	6.8
Copec Voltex Tipo 2 (43kW)	6.3	10.2	5.5	4.9	4.4
Enel X CCS (60kW)	9.0	14.6	7.8	7.0	6.2
Enel X Tipo 2 (28kW)	8.3	13.4	7.1	6.4	5.7
Enel BT1	4.7	7.6	4.1	3.7	3.3
Enel BT4.3	3.5	5.7	3.0	2.7	2.4

Los valores expuestos en esta Tabla 5.8 se pueden ver de forma gráfica en la Figura 5.3 que se muestra a continuación.

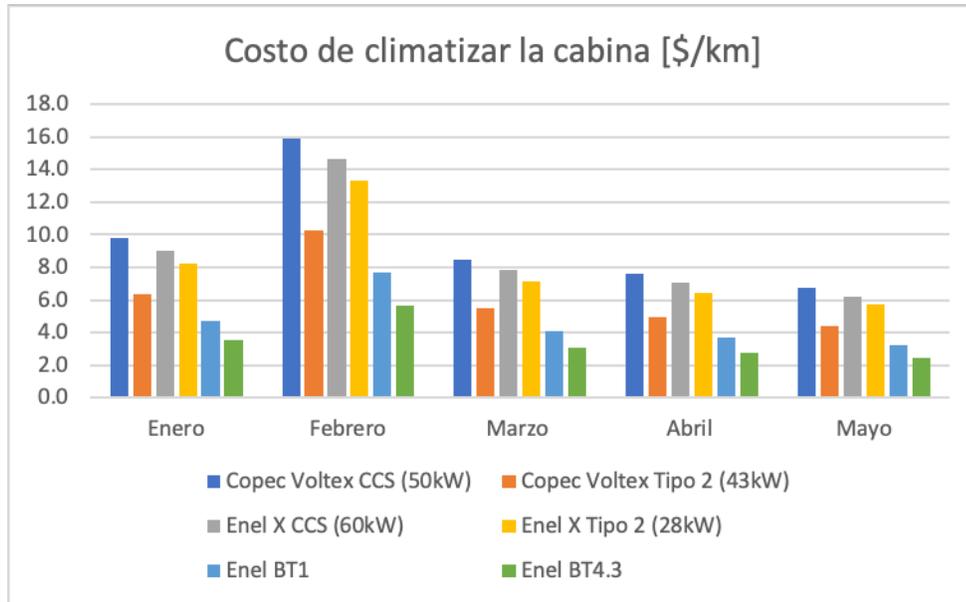


Figura 5.3: Gráfico de costos por climatización en cada mes en CLP por kilómetro según las distintas tarifas (horario de 8:00 a 20:00 horas).

Además, en los viajes que tomen lugar entre las 14:30 y 16:30 horas se tendrá que los costos de climatizar la cabina por kilómetro son distintos. Estos nuevos costos se pueden ver en la Tabla 5.9 que se muestra a continuación.

Tabla 5.9: Costos por climatización en cada mes en CLP por kilómetro según las distintas tarifas (horario de 14:30 a 16:30 horas).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Copec Voltex CCS (50kW)	7.3	19.2	11.0	6.3
Copec Voltex Tipo 2 (43kW)	4.7	12.4	7.1	4.1
Enel X CCS (60kW)	6.8	17.7	10.1	5.8
Enel X Tipo 2 (28kW)	6.2	16.1	9.2	5.3
Enel BT1	3.5	9.2	5.3	3.0
Enel BT4.3	2.6	6.8	3.9	2.3

Los valores expuestos en esta Tabla 5.9 se pueden ver de forma gráfica en la Figura 5.4 que se muestra a continuación.

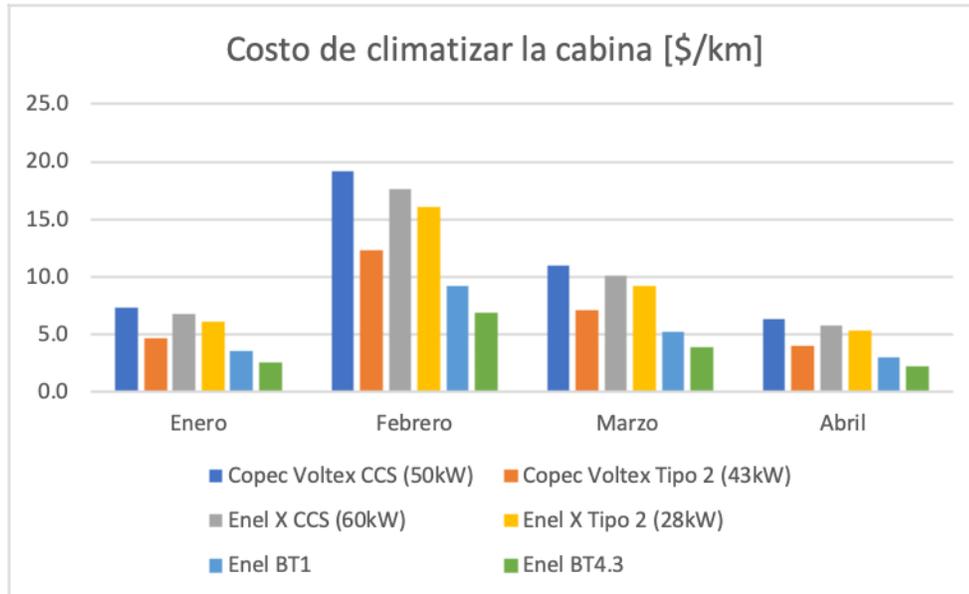


Figura 5.4: Gráfico de costos por climatización en cada mes en CLP por kilómetro según las distintas tarifas (horario de 14:30 a 16:30 horas).

# Capítulo 6

## Análisis de resultados

En este capítulo se presentará el análisis sobre los resultados obtenidos, primero se analizarán los recorridos que tuvieron lugar entre las 8:00 y 20:00 horas. Luego se analizarán los viajes entre las 14.30 y 16:30 horas.

### 6.1. Análisis sobre recorridos entre las 8:00 y 20:00 horas

Para comenzar el análisis de los recorridos entre las 8:00 y las 20:00 horas se debe ver de la Tabla 5.1 hasta la Tabla 5.5. Como se puede notar el mes de Enero es el mes en el cual se cuenta con la mayor cantidad de recorridos documentados, con un total de 7 recorridos. Por otro lado los meses de Febrero y Mayo cuentan solo con 2 recorridos documentados cada uno. Esto fue el resultado de aplicar un filtro sobre los datos en donde se descartaron los viajes que no cumplieran con los requisitos mínimos para ser analizados.

Tomando en cuenta estas diferencias en la cantidad de viajes analizados por mes se puede comenzar a analizar los resultados más importantes de esta parte del trabajo, los cuales se encuentran en la Tabla 5.6. Esta Tabla posee los datos sobre cuanto recorrió el vehículo en cada mes, cuanta energía consumió en total, cuanta de esta energía fue utilizada en el sistema HVAC y cuanto fue el consumo de energía promedio por kilometro del mes.

En dicha Tabla se puede observar que la mayor distancia recorrida en un mes corresponde a la distancia recorrida en el mes de Enero y la menor distancia recorrida en un mes corresponde al mes de Febrero. Esto se dice con el proceso de selección y filtro de recorridos dado la cantidad de recorridos que se analizan por mes. Esto mismo ocurre con la energía total utilizada en el mes y la energía utilizada por el sistema de climatización en el mes.

En la Tabla 5.6 también se puede observar que el porcentaje de energía que se utiliza por el sistema de climatización alcanza su máximo con un 42,23 % del total en el mes de Febrero y su mínimo con un 24,81 % del total en el mes de Marzo. Es importante notar que el resultado de Febrero esta un poco elevado, esto es consecuencia de el número de viajes que se analizan en este mes.

Además, en la Tabla 5.6 se puede ver el promedio de la eficiencia energética de cada mes ( $C_{km/kWh}$ ), aquí se puede observar que el mes de Febrero tiene el rendimiento más bajo, con una eficiencia de 15,715 [km/kWh] en el mes. Este consumo elevado se debe a que los dos viajes analizados de Febrero son trayectos relativamente cortos, por lo que el sistema de climatización trabajó la mayor cantidad del tiempo de viaje en llevar a la cabina a la temperatura de confort, resultando en un mayor consumo del sistema HVAC.

Si se excluye a Febrero de los datos, se puede ver que Enero es el siguiente mes con menor rendimiento, con una eficiencia de 25,453 [km/kWh], esta mejora de forma sostenida en los meses de Marzo, Abril y Mayo, por lo que a medida que se entra en la temporada de otoño-invierno con el pasar de los meses, el consumo decrece. En estos meses las temperaturas comienzan a descender y por ende la carga del sistema de aire acondicionado comienza a bajar. Con esto se puede ver que hay una transición a utilizar de forma menos drástica el aire acondicionado e incluso se comienza a utilizar el sistema de calefacción.

Esto último es importante dado que según el modelo es más eficiente calentar el aire de la cabina que enfriarlo, y esto se debe a que tanto el sol como los ocupantes del vehículo le entregan energía a la cabina, por lo que esta tiende naturalmente a calentarse. Esto hace que el sistema de calefacción reciba ayudas externas para calefaccionar la cabina y que el sistema de aire acondicionado tenga que contrarrestar estas energías para enfriar la cabina.

Estas evoluciones en la eficiencia promedio en cada mes y del porcentaje de energía utilizada en climatización se pueden ver graficadas en las Figuras 5.1 y 5.2 respectivamente. En la Figura 5.1 se puede ver que exceptuando el mes de Febrero, la eficiencia del sistema HVAC comienza a aumentar, por lo que a medida que avanza el año se puede recorrer una mayor distancia climatizando la cabina por kilowatt utilizado.

Por otro lado, en la Figura 5.2 se puede ver que exceptuando Febrero, el porcentaje de energía utilizado en climatización tiende a la baja, lo cual corrobora que a medida que desciende la temperatura y se comienza a usar el aire acondicionado en menor cantidad, junto con el comienzo en el uso del sistema de calefacción, provocan que el vehículo requiera menos energía para climatizar la cabina.

Siguiendo el análisis con los costos por climatización en cada mes, se puede observar en la Tabla 5.8 que el costo por climatización de la cabina más elevado corresponde a 15,9 [\$/km] en el mes de Febrero con la tarifa de carga rápida en Copec Voltex. Por otro lado el menor costo corresponde a 2,4 [\$/km] en el mes de Mayo con tarifa de Enel BT4.3, estos valores incluyen IVA. Por lo que el costo por climatización puede variar ampliamente entre los meses de Enero y Mayo según el mes y la tarifa que se esté utilizando para recargar el vehículo.

## 6.2. Análisis sobre recorridos entre las 14:30 y 16:30 horas

Con el fin de poder analizar en profundidad el comportamiento de los costos por climatización en la cabina del vehículo se obtuvieron los datos de funcionamiento de un viaje por

mes entre las 14:30 y las 16:30 horas. Estos datos se pueden ver en la Tabla 5.7.

En dicha Tabla se puede observar que el viaje del 28 de Enero es similar al viaje del 3 de Abril, ya que en ambos viajes la velocidad promedio es similar (32,73[km/h] en Enero y 31,65[km/h] en Abril). Sin embargo estos viajes tienen una duración distinta, el viaje de Enero duró 1 hora y 52 minutos mientras que el viaje de Abril tuvo una duración de solo 36 minutos.

Esto podría llevar a pensar que en el viaje de Abril el costo de climatización por kilometro es mayor debido a que el sistema de climatización estuvo la mayor parte del viaje llevando a la cabina a la temperatura de confort, pero en realidad en este mes la eficiencia fue mayor, con una eficiencia de 39,695 [km/kWh] mientras que en el viaje de Enero la eficiencia es de solo 34,068 [km/kWh], un 16,3% más bajo que en Abril.

Esto último se debe a que tanto la temperatura ambiente y la radiación solar son menores en Abril, como se puede ver en la Tabla, en este mes la temperatura ambiente promedio y la radiación solar promedio de este rango horario son de 22,35 [C] y 306,16 [W/m<sup>2</sup>] respectivamente. Valores considerablemente menores a los 28,61 [C] y 402,08 [W/m<sup>2</sup>] del mes de Enero, por lo que se puede afirmar que el sistema de aire acondicionado estaba siendo utilizado con una carga menor.

Esto hace que el sistema de climatización pueda alcanzar la temperatura de confort en la cabina más rápido en Abril que en Enero y también que el consumo energético necesario para mantener esta temperatura de confort sea menor, por lo que el consumo energético finalmente es menor. Lo cual se traduce en menores costos por climatización. Esto se condice con el análisis sobre todos los viajes realizados entre las 8:00 y las 20:00 horas, ya que mientras menores sean los aportes externos de energía a la cabina menos energía tendrá que contrarrestar el sistema de climatización.

Por otro lado, en los meses de Febrero y Marzo se puede observar otro fenómeno, el cual consiste en la caída de eficiencia del sistema de climatización a medida que la velocidad promedio del viaje es menor. Esto se debe a que el sistema de climatización aunque logre la temperatura de confort en la cabina debe seguir consumiendo energía para mantener dicha temperatura, por lo que a medida que menos se avance en un viaje, menos energía será utilizada en movilización y más energía será utilizada en climatización.

Finalmente, los costos relacionados en estos viajes se pueden ver en la Tabla 5.9 y en la Figura 5.4. Para los viajes realizados en este rango horario se tiene que el costo por climatización alcanza su valor mínimo en Abril, con 2,3 [\$/km] en tarifa Enel BT4.3. y su máximo en Febrero, con 19,2 [\$/km] en tarifa Copec Voltex de carga rápida. Es importante recordar que en todos los meses la tarifa de Enel BT4.3 es la más baja y Copec Voltex con carga rápida es la tarifa más alta.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Para comenzar las conclusiones de este trabajo de estimación de los costos por climatización en la cabina de un Hyundai Ioniq se concluye que se lograron cumplir los objetivos específicos planteados en el Capítulo 1 sección 2.2.

Se puede concluir lo anterior debido a que en primer lugar se logró crear un modelo que permite estimar las cargas del sistema de climatización del vehículo. Esto lo hace en cada instante sobre el cual se posean datos útiles y toma en cuenta la radiación solar sobre el vehículo, la temperatura ambiente, la convección entre la cabina de este y el medio ambiente, la temperatura de la cabina que varía a medida que actúa el sistema de climatización, el calor metabólico que los ocupantes le entregan a la cabina y las capacidades del sistema de climatización.

Además, para la creación de este modelo de estimaciones se utilizaron los parámetros físicos estimados del Hyundai Ioniq con la finalidad de darle una mayor certeza a este modelo.

Con este modelo de estimaciones creado se logró el segundo objetivo específico, dado que mediante este se pudo estimar la carga sobre el cual se poseen los datos necesarios. Esto sumado a que se poseen los tiempos entre cada instante (5 segundos generalmente) permitió obtener una estimación sobre la energía utilizada por el sistema HVAC en cada intervalo de tiempo. Lo cual facilitó a su vez estimar la energía promedio consumida por el sistema en el mes.

Dicha energía consumida por el sistema de climatización se cuantificó tanto en energía propiamente tal y en eficiencia energética obtenida por el sistema de climatización del vehículo. Con esto se obtuvo que la eficiencia promedio mensual de los viajes que tienen lugar entre las 8:00 y las 20:00 horas va desde los 15,715 [km/kWh] en el mes de Febrero hasta los 36,917 [km/kWh] en el mes de Mayo.

En tercer lugar, se puede concluir que el tercer objetivo específico que corresponde a la estimación de los costos por climatización para cada mes según diferentes distribuidores de energía se logró exitosamente, ya que con las energías estimadas se pudo traducir estos consumos energéticos en costos monetarios utilizando 2 proveedores de energía principales con 6 tarifas diferentes en total.

Los proveedores utilizados para la estimación fueron Enel y Copec Voltex y los costo de climatización por kilómetro van desde los 2,4 [\$/km] en Mayo con tarifa Enel BT4.3 hasta los 15,9 [\$/km] en Febrero con tarifa Copec Voltex de carga rápida.

Además, se logró realizar un análisis sobre los resultados obtenidos sobre los consumos energéticos y los costos asociados al sistema de climatización en cada mes. En este análisis se logró ver una relación entre el funcionamiento del modelo y la variación que tuvieron los resultados mes a mes.

Se pudo determinar que la gran diferencia que se ve en los costos de climatización por kilómetro ligada tanto a la variación de la tarifa que tienen los distintos proveedores como a factores térmicos como la temperatura ambiente y radiación solar típica de cada mes. Además, se determinó que hay factores de eficiencia en los viajes que afectan estas estimaciones como lo es la velocidad promedio del viaje y la duración de este.

Finalmente, debido a que se lograron los objetivos específicos, se concluye que se logró el objetivo general planteado, el cual corresponde a estimar los costos que conlleva mantener la cabina de un vehículo climatizada en base a los datos recabados de vehículos en condiciones de uso reales".

Se puede concluir que se cumple el objetivo general debido a que se siguió una serie de pasos, desde el análisis de los datos recabados en condiciones de uso real, la creación del modelo de estimaciones, la estimación de los consumos energéticos, hasta la obtención de los costos estimados por la climatización con su respectivo análisis.

# Bibliografía

- [1] Zhang, Z. Zhang, C. Liu, C. Chen, X. Chen, J. (2017, Julio). *Annual energy consumption of electric vehicle air conditioning in China*. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University Shanghai High Efficient Cooling System Research Center. Shanghai, China.
- [2] Zhang, Z. Canhg, L. Chen, Y. Feng, X. Wang, J. Wang, X. (2018, abril). *The solutions to electric vehicle air conditioning systems: A review*. Institute of Architecture and Civil Engineering, North China University of Science and Technology Hebei earthquake engineering research center. Tangshan, China.
- [3] Cvok, I. Deur, J. Skugor, B. (Junio, 2020). *Control trajectory optimisation and optimal control of an electric vehicle HVAC system for favourable efficiency and thermal comfort*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. Zagreb, Croacia.
- [4] Iora, P. Tribioli, L. (Enero, 2019). *Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles' Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data*. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Università di Brescia Department of Industrial Engineering, Università di Roma Niccolo Cusano. Roma, Italia.
- [5] Olesen, B. Moreno-Beltron, D. Hangstrom, K. (Abril, 2001) *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Cap. 6.
- [6] Bahrami, M. (Septiembre, 2015) *Forced Convection Heat Transfer*. Simon Fraser University. Canada.
- [7] Ministerio de energía. 2021. Explorador Solar [En línea] <[solar.minenergia.cl/exploración](http://solar.minenergia.cl/exploración)> [Consulta: 28 de Septiembre de 2021].
- [8] Enel Distribución Chile S.A. 2021. *Tarifas de suministro eléctrico*. Santiago, Chile.
- [9] Hyundai Motor Company. 2017. *Ficha técnica Hyundai Ioniq Eléctrico*. Seúl, Corea del sur.
- [10] Wikipedio. 2021. Formula del semiverseno [En línea] <[https://es.wikipedia.org/wiki/Fórmula\\_del\\_semiverseno](https://es.wikipedia.org/wiki/Fórmula_del_semiverseno)> [Consulta: 4 de Octubre de 2021].

# Anexos

## A - Especificaciones técnicas Hyundai Ioniq

A continuación se muestran las especificaciones técnicas correspondientes al Hyundai Ioniq, vehículo sobre el cual se realizaron los cálculos y estimaciones.

Tabla .1: Ficha técnica Hyundai Ioniq.

Tipo de Vehículo	EV GLS FL
Motor eléctrico / Potencia	Permanent Magnet Synchronous Motor 88 kW / 118 hp
Bateria de polimero de litio-ion	319 volt
Autonomia	328 KM*
Transmisión / N° de velocidades	Caja reductora de velocidad única
Neumáticos	205/55 R16
Largo /Ancho / Alto (mm)	4470 / 1820 / 1475
Distancia entre ejes (mm)	2700
Peso bruto vehicular (kg)	1900
Capacidad maletero (L) (VDA)	462 (min) / 1417 (max)
SEGURIDAD	
Airbag	7AB
Asistente de partida en pendiente HAC	.
Cámara de retroceso con guías dinámicas	.
Control de Estabilidad (ESC)	.
Monitor de Presión de Neumáticos (TPMS)	.
Sensor de estacionamiento delantero y trasero	.
Sensor de Punto Ciego (BSD) con alerta de tráfico cruzado	.
Sistema de asistencia de frenado (ABS + EBD)	.
EQUIPAMIENTO	
Alzavidrios electricos totales, delanteros con auto up/down y antiapriete	.

Asiento conductor con soporte lumbar de 2 vías eléctrico	.
Asiento conductor eléctrico	.
Asientos delanteros calefaccionados	.
Asientos abatibles 60/40	.
Auto Hold	.
Cargador inalámbrico de celular	.
Climatizador + desempañador automático + Salida aire plazas traseras	.
Cluster de supervisión con pantalla LCD 7"	.
Control crucero	.
Control de audio y bluetooth al volante	.
Encendido de luces automático	.
Espejo retrovisor electrocrómico	.
Freno de mano electrónico	.
Kit de movilidad temporal	.
Llantas de aleación	16"
Llave inteligente con botón de encendido	.
Luces delanteros LED	.
Luces traseras y neblineros traseros LED	.
Luz de día LED	.
Neblinero trasero LED	.
Paddle Shifter	.
Radio Touch 8con Apple CarPlay & Android Auto	.
Retrovisores eléctricos plegables con señalizador LED	.
Retrovisores eléctrico y calefaccionados	.
Selección de modo de manejo	.
Sensor de lluvia	.
Tweeters	.
Volante con regulación en altura y profundidad	.
Volante Calefaccionado	.
Volante y pomo forrados en ecocuero	.
OTROS	
Frenos delanteros	Discos ventilados
Frenos traseros	Discos solidos
Nº de pasajeros / Nº de puertas	05-abr
Suspensión delantera / trasera	Mcpherson / Barra de torsión
Tipo de Combustible	Electricidad
Torque máximo (NM) motor eléctrico	295
Tracción	Delantera
*Según el manual del propietario, este puede variar entre 167 a 328 Km, dependiendo de las condiciones de uso, promedio 245 Km.	

## B - Datos extraídos del explorador solar

### Radiación solar

Tabla .2: Radiación solar promedio por hora en cada mes [ $W/m^2$ ].

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	2.9	0	0	0	0
7	31.9	16.8	5.3	0	0
8	141.1	123.4	112.2	86.7	36.5
9	252.3	239.9	226.1	187.2	132.9
10	357.2	345.4	334.1	276.3	199.2
11	436.8	434.4	414.2	346.3	252.4
12	484.1	484.1	457.8	384.5	279.1
13	490.5	499.6	471.2	395.6	284.0
14	467.1	471.9	443.1	363.7	266.7
15	413.7	420.0	392.0	316.1	234.4
16	325.4	333.2	305.5	238.7	165.6
17	219.2	224.3	196.0	143.7	108.8
18	107.9	109.6	86.3	29.4	0
19	16.3	11.7	1.3	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0

En la Tabla .2 mostrada anteriormente se puede ver la radiación solar utilizada para confeccionar el modelo de estimaciones corresponde a la radiación de las coordenadas cuya latitud es -33,4739 y su longitud es -70,6676 (coordenadas promedio de posición del vehículo).

### Temperatura ambiente

La temperatura promedio utilizada para confeccionar el modelo de estimaciones corresponde a la temperatura de las coordenadas latitud -33,4739 y longitud -70,6676. Los valores de las temperaturas promedio del lugar están presentes en la Tabla .3.

Tabla .3: Temperatura ambiente promedio por hora en cada mes [C].

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
0	16.8	16.6	15.2	11.8	9.2
1	16.1	15.9	14.5	11.2	8.8
2	15.4	15.3	13.9	10.5	8.3
3	14.9	14.9	13.3	10.1	8.1
4	14.6	14.4	12.7	9.5	7.7
5	14.0	14.0	12.4	9.3	7.7
6	14.5	13.7	11.8	8.9	7.3
7	16.1	14.9	12.7	9.0	7.0
8	18.7	17.3	14.8	10.5	7.4
9	21.2	20.0	17.6	13.2	9.2
10	23.7	22.5	20.4	16.1	12.1
11	25.8	24.8	22.7	18.5	14.7
12	27.3	26.4	24.7	20.5	16.5
13	28.5	27.7	26.1	21.9	17.9
14	29.1	28.5	27.0	22.7	18.6
15	28.8	28.2	26.9	22.6	18.4
16	28.0	27.4	26.0	21.7	17.6
17	26.9	26.3	24.8	20.4	16.0
18	25.5	24.8	22.9	18.2	14.2
19	23.5	22.6	20.6	16.5	12.9
20	21.4	20.7	19.0	15.2	12.0
21	19.9	19.3	17.8	14.1	11.1
22	18.7	18.3	16.8	13.2	10.3
23	17.7	17.4	15.9	12.5	9.8

## C - Modelo CAD de la cabina

### Confección del modelo CAD

Para modelar la cabina del Hyundai Ioniq se utilizó el programa Fusion 360 de Autodesk, en este programa se utilizaron 3 fotos del Ioniq, una delantera, una trasera y una lateral. Estas fotos se posicionaron y escalaron para que coninsidan en escala 1:1 con el Ioniq de la vida real.

Con las fotos posicionadas y escaladas se procedió a dibujar el contorno de la cabina en cada cara y posteriormente obstruyendo estos dibujos para darle forma a la cabina. En la Figura .1 se puede ver la cabina con las fotos utilizadas.

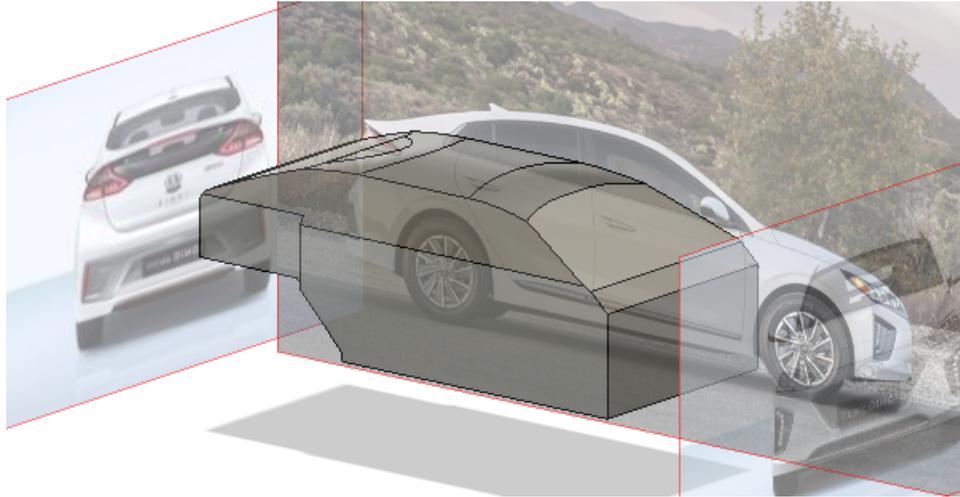


Figura .1: Modelo CAD de la cabina con fotos de referencia utilizadas.

El modelo de esta cabina incluye compartimiento de equipaje del Ioniq debido a que comparte el mismo aire que la cabina de pasajeros. En la Figura .2 se puede ver la cabina sin las fotos de referencia.

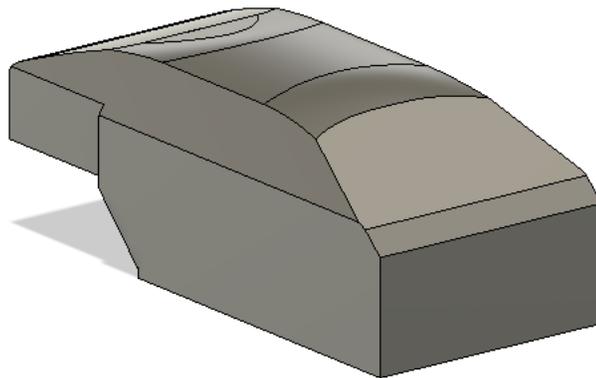


Figura .2: Modelo CAD de la cabina sin fotos de referencia.

Este modelo tiene más volumen que el volumen de aire que en realidad hay en la cabina, debido a que elementos como el tablero del vehículo, la consola centra y los asientos le restarán volumen de aire a la cabina. Es por esto que al modelo de la cabina mostrado anteriormente se le restó un aproximado de lo que corresponde a el tablero y la consola central. Este nuevo modelo de la cabina se puede ver a continuación en la Figura .3.

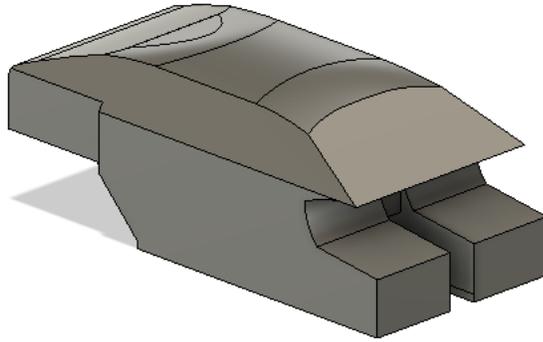


Figura .3: Modelo CAD de la cabina sin tablero ni consola central.

Por otro lado se modelaron los asientos por separado para poder calcular su volumen y restarlo al volumen de la cabina sin tablero ni consola central. El modelo de estos asientos se puede ver en la Figura .4.

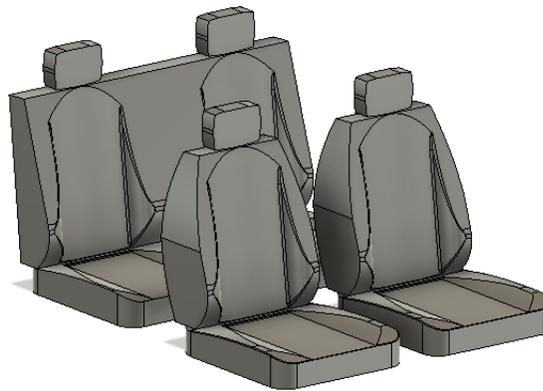


Figura .4: Modelo CAD de los asientos del Hyundai Ioniq.

## Resultados del modelo CAD

A continuación en la Tabla .4 se muestran los resultados de los volúmenes de la cabina calculados con el modelo CAD.

Tabla .4: Volúmenes calculados por el modelo CAD.

Volúmenes Calculados	
Volumen de aire en cabina sin asientos, consola y tablero [ $m^3$ ]	3.166
Volumen del tablero y la consola central [ $m^3$ ]	0.387
Volumen de asientos [ $m^3$ ]	0.54
Volumen de aire en la cabina [ $m^3$ ]	2.24

Además, es de vital importancia calcular con el modelo CAD un aproximado de las superficies que corresponden a carrocería y vidrio. Estas superficies se pueden encontrar en la Tabla .5.

Tabla .5: Superficies calculadas por el modelo CAD.

Estimados por modelo CAD	
Superficie de ventanas [ $m^2$ ]	2.971
Superficie de carrocería [ $m^2$ ]	5,528