



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

**ANÁLISIS DE AUTONOMÍA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS
BASADO EN DATOS DE OPERACIÓN REALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

MAXIMILIANO ALFONSO RAMÍREZ AGUILERA

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

PROFESORA CO-GUÍA:
CONSUELO OCARANZA CISTERNAS

COMISIÓN:
ESTEBAN KUZMANIC REYES

Esta Memoria fue parcialmente financiada por el Proyecto CASE 20CTEM-131733

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: MAXIMILIANO ALFONSO RAMÍREZ AGUILERA
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN

ANÁLISIS DE AUTONOMÍA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS BASADO EN DATOS DE OPERACIÓN REALES

El presente trabajo de título se enfoca en el análisis de la autonomía de vehículos eléctricos mediante la utilización de datos de operación reales, recogidos de un grupo de 22 taxis eléctricos que operan en Santiago de Chile. Las cifras se recopilaban en el periodo de un año, lo que facilitó la obtención de una visión detallada y precisa respecto cómo distintos factores influyen en la autonomía de estos vehículos en condiciones de uso cotidiano.

El estudio tiene como objetivo principal identificar y cuantificar el impacto de diversas variables operativas sobre la autonomía de los vehículos eléctricos. Entre las variables se encuentran las condiciones climáticas, el tipo de trayecto (urbano, carretera o híbrido), la extensión de la ruta, la topografía, la velocidad promedio, el uso del sistema de climatización, y el estilo de conducción. A partir de estos datos, se aplicaron modelos matemáticos que permitieron estimar el consumo energético de los vehículos bajo diferentes escenarios operativos.

El vehículo utilizado corresponde al modelo Hyundai Ioniq 2019 y se evaluó su desempeño en condiciones reales de operación. Los resultados obtenidos de este análisis permiten proporcionar recomendaciones prácticas para optimizar la eficiencia energética y prolongar la autonomía de los vehículos eléctricos. Dentro de lo anterior, se puede contemplar sugerir que los conductores mantengan un estilo de conducción con velocidades más estables y regular el uso del sistema de climatización, junto con recomendar a los fabricantes posibles mejoras del diseño y la configuración de los vehículos.

La investigación revela que factores como la temperatura ambiente y el uso del aire acondicionado tienen un impacto significativo en el consumo de energía, reduciendo la autonomía del vehículo en comparación a condiciones óptimas, donde no se requiera de un excesivo uso del sistema de climatización. Además, se observa que la variación de altura del trayecto influye en el consumo energético cuando se presentan rutas con pendientes pronunciadas.

El presente trabajo no solo contribuye al entendimiento de los factores que afectan la autonomía de los vehículos eléctricos bajo operaciones reales, sino que también proporciona un marco de referencia para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la electromovilidad.

Las recomendaciones derivadas de este estudio, como masificar el análisis de rutas para un posterior desarrollo de un mapa energético, tienen el potencial de mejorar la experiencia de los usuarios de vehículos eléctricos y promover una adquisición más amplia de este medio de transporte, contribuyendo así a la reducción de emisiones y a la mitigación del cambio climático.

*Para todos los que me han apoyado siempre,
aquellos que están hoy a mi lado y quienes,
donde sea el lugar en el que se encuentren,
vivirán por siempre en mi corazón.*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis papás por su constante apoyo, motivación y cariño. Solange y Juan, aprecio infinitamente el amor que me han entregado durante toda la vida, siempre han estado conmigo disfrutando de mis logros y tirando para arriba en los momentos difíciles que nos ha tocado vivir. A mi hermano Luckas, quien sin dudarle entrega su cariño y apoyo, sobre todo en malas situaciones.

También, a mi segunda familia: mi mami Nelly, Gianis y Seba, quienes me han estado acompañando, ayudando y amando desde que tengo memoria. Donde faltan tres importantes integrantes mi tata Hernán, mi mami Beno y mi tata Juan, quienes amé, amo y amaré, y me han hecho mucha falta. Se que todos ellos sienten un inmenso orgullo y, donde sea que estén, se encuentran disfrutando de los logros de toda nuestra familia.

A ti, Daphne, mi mejor amiga, mi confidente, mi compañera de vida, mi pareja, eres uno de los pilares fundamentales y una de las principales motivaciones que me llevan a seguir adelante. Agradezco todo el amor brindado y los inolvidables momentos juntos que me han hecho crecer y ser la persona que soy hoy en día.

Al gran grupo de amigos que encontré fuera de la universidad. Marcos, Carlos, Felipe M., Felipe C. (Pancho), Celis, Diego, Cesar y Fabián, gracias por aguantar los enojos, dar, día a día, risas y bromas que ayudan a desconectarse y relajarse, además del apoyo brindado.

Agradecer también a la gran parte de mi familia que me faltó por mencionar. Son muy importantes en mi vida aún cuando no estamos en constante contacto, han aportado a mi desarrollo personal y profesional, de distintas formas, desde que tengo memoria.

Finalmente, agradecer a todos quienes forman parte del departamento de Ingeniería Mecánica, docentes, funcionarios, compañeros y todos quienes aportaron y aportan al desarrollo de cada estudiante. Sobre todo, al profesor Williams, a Consuelo, Esteban e Ignacio, quienes me guiaron, ayudaron y aconsejaron durante esta última etapa final.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcances	4
2. Antecedentes	5
2.1. Vehículo eléctrico	5
2.1.1. Tipos de vehículos eléctricos (EV)	6
2.1.2. Baterías	6
2.2. Electromovilidad	7
2.2.1. Situación actual	8
2.3. Vehículo en estudio	9
2.4. Sistema de climatización	10
2.4.1. Sistema de enfriamiento	11
2.4.2. Sistema de calefacción	12
2.4.3. Modelo lineal para estimar el consumo del sistema de climatización	13
2.5. Estado de carga SOC	15
2.6. Modelos existentes	16
2.6.1. Eficiencia energética de un EV	16
2.6.2. Rendimiento de un EV	16
2.6.3. Consumo mecánico o de tracción	17
2.6.4. Consumo eléctrico	18
2.6.5. Eficiencia del motor eléctrico	19
2.7. Polinomio de interpolación de Lagrange	20
3. Metodología	22
3.1. Ruta empleada	22
3.2. Procesamiento de datos y cálculos realizados	25
3.2.1. Manejo de datos	25
3.2.2. Agrupación de datos	25
3.2.3. Cálculo de potencia y energía	27
3.2.4. Rendimiento del vehículo:	28
3.2.5. Diferencia horaria	29
4. Resultados	30

4.1.	Características generales de cada tipo de trayecto	30
4.2.	Eficiencia del motor eléctrico	30
4.3.	Energía consumida para cada tipo de trayecto	30
4.3.1.	Trayecto corto	31
4.3.2.	Trayecto mediano	32
4.3.3.	Trayecto largo	33
4.4.	Velocidad, aceleración y elevación para cada tipo de trayecto	34
4.4.1.	Velocidades, aceleraciones y elevaciones del trayecto corto	34
4.4.2.	Velocidades, aceleraciones y elevaciones del trayecto Mediano	35
4.4.3.	Velocidades, aceleraciones y elevaciones del trayecto Largo	36
4.5.	Rendimientos de los vehículos a lo largo de cada recorrido	37
4.6.	Rendimientos según tipo de ruta	38
4.7.	Energía consumida en la rueda para cada recorrido	39
4.7.1.	Recorridos trayecto corto	39
4.7.2.	Recorrido trayecto mediano	40
4.7.3.	Recorridos trayecto largo	40
4.8.	Comportamiento de los recorridos en función de la posición	41
4.8.1.	Energías consumidas trayecto corto	41
4.8.2.	Energías consumidas trayecto mediano	42
4.8.3.	Energías consumidas trayecto largo	42
4.9.	Características promedio por tramos	43
4.9.1.	Características promedios para el trayecto mediano	43
4.9.2.	Características promedios para el trayecto largo	44
4.9.3.	Características promedios para los recorridos de mayor y menor consumo del trayecto largo	45
4.10.	Energía consumida por sistema de climatización	47
4.10.1.	Energías por sistema de climatización trayecto corto	47
4.10.2.	Energías por sistema de climatización trayecto mediano	48
4.10.3.	Energías por sistema de climatización trayecto largo	49
4.11.	Consumo del sistema de climatización por mes	50
4.12.	Variación porcentual de la energía según horario	51
4.13.	Consumo por trayecto	52
5.	Análisis y discusión	53
5.1.	Análisis de las características del trayecto y del vehículo	53
5.2.	Análisis del consumo energético según el tipo de trayecto	54
5.2.1.	Trayecto corto	54
5.2.2.	Trayecto mediano	55
5.2.3.	Trayecto largo	56
5.3.	Análisis del comportamiento energético de los recorridos	59
5.4.	Análisis del consumo energético por el sistema de climatización	61
5.5.	Análisis del efecto del horario en el consumo energético	63
6.	Conclusiones	64
6.1.	Recomendaciones y trabajo futuro	65
	Bibliografía	67

Anexos	70
A. Acumulación de puntos	70
B. Rutas seleccionadas	71
C. División por tramos	74
D. Consumo energético de recorridos no analizados para los trayectos corto, mediano y largo	75
E. Velocidad, aceleración y elevación de recorridos no analizados para los trayectos corto, mediano y largo	86

Índice de Tablas

2.1.	Ficha técnica del EV Hyundai Ioniq 2019 [18].	10
2.2.	Diferentes condiciones climáticas [22].	14
3.1.	Rutas definidas para el presente estudio.	26
3.2.	Valores utilizados para la ecuación 2.12 que permite obtener la energía en la rueda [16] y [12]	27
3.3.	Temperaturas estacionales definidas en base a los datos del explorador solar [23].	28
3.4.	Distribución horaria establecida para los distintos recorridos.	29
4.1.	Tabla resumen para cada tipo de trayecto.	30
4.2.	Rendimiento de cada recorrido para el trayecto corto, con su respectivo promedio.	37
4.3.	Rendimiento de cada recorrido para el trayecto mediano, con su respectivo promedio.	38
4.4.	Rendimiento de cada recorrido para el trayecto largo, con su respectivo promedio.	38
4.5.	Rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo.	39
4.6.	Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto mediano.	43
4.7.	Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo.	44
4.8.	Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo con mayor consumo.	45
4.9.	Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo con menor consumo.	45
4.10.	Información de la distancia, duración y mes para cada recorrido del trayecto corto.	47
4.11.	Información de la distancia, duración y mes para cada recorrido del trayecto mediano.	48
4.12.	Información de la distancia, duración y mes para cada recorrido del trayecto largo.	49
4.13.	Potencia debido al sistema de climatización y la energía que consume por segundo en cada mes del año.	50
4.14.	Energía consumida, especificando el horario, para cada recorrido del trayecto extra de la Figura B.5 del Anexo.	51
4.15.	Energía consumida promedio y diferencia porcentual para cada rango horario.	51
4.16.	Energía que se consume, según bloque horario, al realizar el trayecto corto, figuras B.1 y B.2 del Anexo.	52
4.17.	Energía que se consume, según bloque horario, al realizar el trayecto mediano, Figura B.3 del Anexo.	52
4.18.	Energía que se consume, según bloque horario, al realizar el trayecto largo, Figura B.4 del Anexo.	52

Índice de Ilustraciones

1.1.	Evolución de las ventas anuales de vehículos eléctricos entre 2013 y 2024	2
2.1.	Esquema del traspaso de energía [31].	5
2.2.	Esquema de la estructura de los distintos tipos de vehículos eléctricos [26]. . .	6
2.3.	Ranking de baterías para vehículos eléctricos [26].	7
2.4.	Vistas delantera, lateral y trasera del Hyundai Ioniq 2019 [17].	10
2.5.	Esquema del sistema de refrigeración, ciclo del refrigerante.	12
2.6.	Esquema del sistema con bomba de calor [15].	13
2.7.	Evolución de la potencia del sistema de climatización ante diferentes condiciones climáticas [22].	14
2.8.	Comportamiento de cada factor vs la potencia [33].	17
2.9.	Descripción visual del razonamiento detrás del polinomio de Lagrange de orden 2 [9].	21
3.1.	Etapas a seguir para el desarrollo del presente trabajo.	22
4.1.	Energías para el trayecto corto con menor tráfico.	31
4.2.	Energías para el trayecto corto con mayor tráfico.	31
4.3.	Energías para el trayecto mediano con menor tráfico.	32
4.4.	Energías para el trayecto mediano con mayor tráfico.	32
4.5.	Energías para el trayecto largo con menor tráfico.	33
4.6.	Energías para el trayecto largo con mayor tráfico.	33
4.7.	Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto corto con menor tráfico. . .	34
4.8.	Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto corto con mayor tráfico. . .	35
4.9.	Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto mediano con menor tráfico.	35
4.10.	Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto mediano con mayor tráfico.	36
4.11.	Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto largo con menor tráfico. . .	36
4.12.	Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto largo con mayor tráfico. . .	37
4.13.	Energía consumida en la rueda para cada recorrido del trayecto corto.	39
4.14.	Energía consumida en la rueda para cada recorrido del trayecto mediano.	40
4.15.	Energía consumida en la rueda para cada recorrido del trayecto largo.	40
4.16.	Comportamiento de la energía en la rueda para cada recorrido en el trayecto corto.	41
4.17.	Comportamiento de la energía en la rueda para cada recorrido en el trayecto mediano.	42
4.18.	Comportamiento de la energía en la rueda para cada recorrido en el trayecto largo.	42
4.19.	Consumo acumulado en función del kilómetro recorrido de cada tramo del trayecto mediano.	43
4.20.	Consumo acumulado en función del kilómetro recorrido de cada tramo del trayecto largo.	44

4.21.	Comparación del consumo acumulado en función del kilómetro para el recorrido con mayor y menor energía.	46
4.22.	Consumo por mes del sistema de climatización para cada recorrido en el trayecto corto.	47
4.23.	Consumo por mes del sistema de climatización para cada recorrido en el trayecto mediano.	48
4.24.	Consumo por mes del sistema de climatización para cada recorrido en el trayecto largo.	49
4.25.	Variación de la potencia y energía consumida debido al aire acondicionado. . .	50
A.1.	Cúmulo de puntos en una misma ubicación geográfica para un solo viaje. . . .	70
B.1.	Trayecto corto: Metro Escuela Militar - Hotel Hilton camino 1.	71
B.2.	Trayecto corto: Metro Escuela Militar - Hotel Hilton camino 2.	71
B.3.	Trayecto mediano: Copec Costanera Norte km 33.75 - Aeropuerto Arturo Merino Benítez.	72
B.4.	Trayecto largo: Los presidentes 1498, Maipú - Copec Costanera Norte km 33.75.	72
B.5.	Trayecto extra para horarios: Aeropuerto Arturo Merino Benítez - Túnel Costanera Norte Gral. Prieto 1430, Independencia.	73
C.1.	División realizada al trayecto largo de la Figura B.4 del Anexo.	74
D.1.	Energías para recorrido extra TC1 del trayecto corto.	75
D.2.	Energías para recorrido extra TC2 del trayecto corto.	76
D.3.	Energías para recorrido extra TM1 del trayecto mediano.	76
D.4.	Energías para recorrido extra TM2 del trayecto mediano.	77
D.5.	Energías para recorrido extra TM3 del trayecto mediano.	77
D.6.	Energías para recorrido extra TM4 del trayecto mediano.	78
D.7.	Energías para recorrido extra TM5 del trayecto mediano.	78
D.8.	Energías para recorrido extra TM6 del trayecto mediano.	79
D.9.	Energías para recorrido extra TM7 del trayecto mediano.	79
D.10.	Energías para recorrido extra TM8 del trayecto mediano.	80
D.11.	Energías para recorrido extra TM9 del trayecto mediano.	80
D.12.	Energías para recorrido extra TM10 del trayecto mediano.	81
D.13.	Energías para recorrido extra TM11 del trayecto mediano.	81
D.14.	Energías para recorrido extra TM12 del trayecto mediano.	82
D.15.	Energías para recorrido extra TM13 del trayecto mediano.	82
D.16.	Energías para recorrido extra TM14 del trayecto mediano.	83
D.17.	Energías para recorrido extra TL1 del trayecto largo.	83
D.18.	Energías para recorrido extra TL2 del trayecto largo.	84
D.19.	Energías para recorrido extra TL3 del trayecto largo.	84
D.20.	Energías para recorrido extra TL4 del trayecto largo.	85
E.1.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TC1 del trayecto corto. .	86
E.2.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TC2 del trayecto corto. .	87
E.3.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM1 del trayecto mediano. .	87
E.4.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM2 del trayecto mediano. .	88
E.5.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM3 del trayecto mediano. .	88
E.6.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM4 del trayecto mediano. .	89
E.7.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM5 del trayecto mediano. .	89
E.8.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM6 del trayecto mediano. .	90
E.9.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM7 del trayecto mediano. .	90

E.10.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM8 del trayecto mediano.	91
E.11.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM9 del trayecto mediano.	91
E.12.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM10 del trayecto mediano.	92
E.13.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM11 del trayecto mediano.	92
E.14.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM12 del trayecto mediano.	93
E.15.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM13 del trayecto mediano.	93
E.16.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM14 del trayecto mediano.	94
E.17.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL1 del trayecto largo.	94
E.18.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL2 del trayecto largo.	95
E.19.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL3 del trayecto largo.	95
E.20.	Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL4 del trayecto largo.	96

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

Un vehículo eléctrico corresponde a un medio de transporte impulsado por uno o más motores eléctricos que permiten transformar la energía eléctrica en energía mecánica, lo que da paso a su movimiento. Estos, pueden ser clasificados en tres tipologías, tal como indica el Ministerio de Energía, que corresponden a: eléctricos a batería o 100 % eléctricos, eléctricos híbridos enchufables y eléctricos con celdas de combustible. Estos, incluyen vehículos de dos o tres ruedas, automóviles, camionetas comerciales ligeras, autobuses, camiones y otros.

Por otra parte, la electromovilidad hace referencia al uso de estos vehículos eléctricos y, en definitiva, existen dos tipos de tecnología: el auto con batería de ion-litio y el fuel cell. Mientras que el primero requiere una recarga eléctrica de varias horas, el segundo utiliza hidrógeno como combustible para generar electricidad, lo que permite tener una recarga rápida y mayor autonomía [3].

En el último tiempo, el cambio climático se ha vuelto un tema que ha tomado fuerza y ha pasado de ser un tópico de debate a una realidad que influye en las decisiones actuales en búsqueda de elementos, proyectos y políticas amigables con el medio ambiente. Una de las principales causas del cambio climático es el efecto invernadero, donde algunos gases de la atmósfera retienen el calor del sol e impiden que escape al espacio, actuando de manera similar a un cristal de un invernadero.

Muchos de los gases de efecto invernadero (GEI) se encuentran de manera natural, sin embargo, la actividad humana ha provocado un aumento en la concentración de algunos de ellos en la atmósfera, tales como: dióxido de carbono (CO_2), metano, óxido nitroso y gases fluorados. Una de las principales industrias responsables del aumento de las emisiones de estos compuestos es el sector del transporte, debido a la combustión de carbón, petróleo y gas [10].

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, este sector ha contribuido con alrededor del 14 % de las emisiones mundiales de GEI, siendo el transporte terrestre el principal emisor, seguido del marítimo y la aviación, que contribuyen con el 2.2 % de dichas emisiones [7].

Dentro de este contexto, es que se debe avanzar en la adopción masiva de automóviles eléctricos mediante infraestructura de carga de vehículos, en conjunto al desarrollo de aspectos técnicos, regulatorios y económicos que permitan fomentar aún más la masificación de estos transportes, con el objetivo de reducir las emisiones de GEI.

Respecto a lo anterior, Chile ha formado parte de diversos acuerdos internacionales que buscan reducir las emisiones de GEI y que abordan los desafíos del cambio climático, a través de diferentes medidas cuyo objetivo es disminuir, para el año 2030, la intensidad de las emisiones en un 30 % con respecto a los niveles observados en 2007 [3]. Más aún, se han implementado diversas políticas públicas para fomentar la adquisición de este tipo de transporte, las que se respaldan con aumentos en las infraestructuras de carga [28].

1.2. Motivación

Durante el año 2017, las ventas de vehículos eléctricos superó el millón de unidades a nivel mundial, lo que corresponde a un 54% más respecto del 2016, con una venta de 750 mil unidades. El stock de este medio de transporte, durante el 2017, fue de 3 millones en el mundo, actuando como un aumento importante respecto al registro de años anteriores.

En Chile, la evolución general de las ventas de vehículos eléctricos ha ido al alza desde el año 2013, tal como se muestra en la Figura 1.1. Se observa un claro descenso durante el 2020, esto se debe al contexto global conocido y causado por el COVID, lo que golpeó la economía mundial y, en específico, el sector automotriz, dando por resultado una situación esperable.

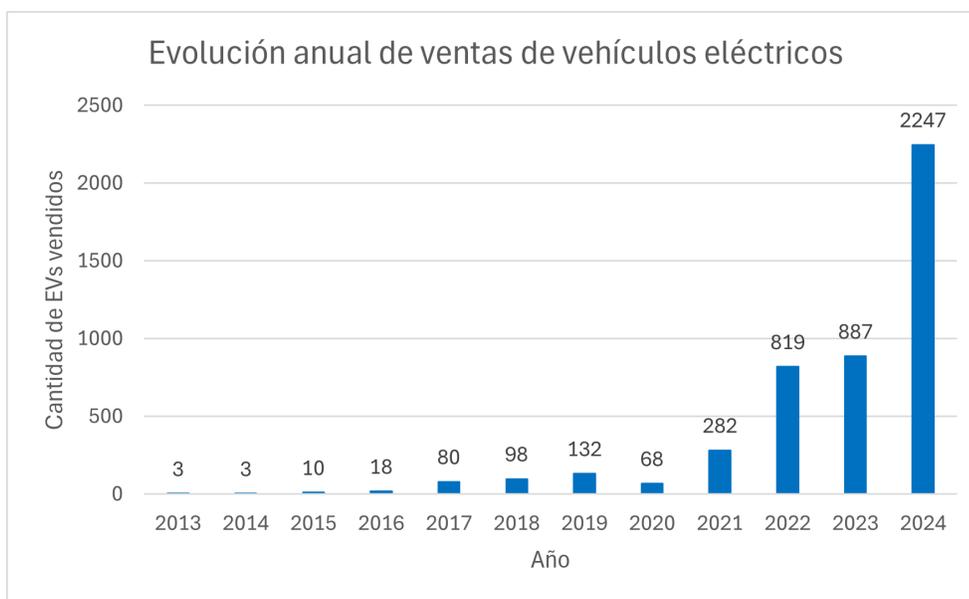


Figura 1.1: Evolución de las ventas anuales de vehículos eléctricos entre 2013 y 2024

Además, al proyectar las ventas a futuro, se espera un total de 14.000 vehículos eléctricos livianos más 2.300 buses eléctricos, como mínimo, para el año 2030. Esta proyección se realizó en base a una extrapolación de los datos a nivel mundial, considerando el escenario de New Policies, que se define como el escenario en el que los gobiernos incorporan las medidas y

políticas necesarias para dar el correcto impulso a la electromovilidad [25].

Por otro lado, en Chile, cerca de un tercio del consumo energético total proviene del sector de transporte, el que es superado solo por el sector minero. Dentro de esta área, más del 90 % de la energía se produce por combustibles fósiles [25] bajo procesos bastante contaminantes. Más aún, este campo es responsable del 25 % de las emisiones de GEI [5], aproximadamente, en el país, además de gases nocivos que dañan el medioambiente y la salud de las personas.

Por lo tanto, es de vital importancia el estudio de este medio de transporte, pues una correcta implementación, tanto en el mundo privado como público, puede ayudar a mitigar la crisis climática y formar una red energética sustentable en esta área.

Es dentro de este contexto que se busca proponer una relación entre la autonomía y las condiciones de operación de vehículos eléctricos livianos a lo largo de una ruta establecida, con el fin de comprender su comportamiento en función de la posición.

Para lo anterior, se buscará determinar la relación entre las condiciones de ruta y el modelo de potencia, evaluar el efecto del ambiente sobre el comportamiento de la potencia, analizar el comportamiento energético en el largo total del viaje y determinar el consumo en un trayecto establecido.

El plan de trabajo propuesto para el estudio consta, en términos generales, de una recopilación y limpieza de los datos medidos junto a un estudio de las librerías y ambientes de Python que son útiles para el análisis. Además, se debe realizar una revisión bibliográfica y una investigación del vehículo en cuestión.

Todo lo mencionado, da paso a realizar una correcta importación de la data y recopilar los parámetros necesarios para la implementación de los modelos de potencia para obtener los consumos en función del tiempo. Luego, se observa el gasto energético en función de la posición para proceder al análisis de la autonomía en función de la posición en cada trayecto.

El trabajo realizado será expuesto mediante sus distintas secciones, iniciando con la breve contextualización y motivación, proporcionadas anteriormente, luego con los objetivos y alcances del estudio. Posteriormente, indicando antecedentes teóricos relevantes para este caso, una descripción más detallada de la metodología empleada, para dar paso a los resultados con su respectivo análisis. Finalmente, se evidencian las conclusiones de la investigación con pequeñas recomendaciones y trabajos a futuro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer una relación entre la autonomía y las condiciones de operación de vehículos eléctricos livianos a lo largo de una ruta establecida, con el fin de comprender su comportamiento en función de la posición.

1.3.2. Objetivos específicos

Para cumplir lo anterior, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la relación entre las condiciones de ruta y el modelo de potencia.
- Evaluar el efecto del ambiente sobre el comportamiento de la potencia.
- Analizar el comportamiento energético en el largo total del viaje.
- Determinar el consumo en un trayecto establecido.

1.4. Alcances

El presente estudio tiene como base los datos recopilados durante el desarrollo del proyecto Ruta Sustentable [6], donde se monitorearon y estudiaron un total de 22 taxis eléctricos, de la empresa Transvip, durante el periodo comprendido entre enero y diciembre del 2020. La adquisición de los valores se realizó mediante dispositivos datalogger en los vehículos mencionados. Estas cifras fueron pre-procesadas para su análisis mediante Python, software de código abierto para procesamiento de información.

Las variables de operación adquiridas corresponden a: temperatura ambiente, estado de la carga (SOC), velocidad y posición. Además, se debe recopilar características técnicas generales del vehículo eléctrico y de su batería, tales como: tipo, marca, dimensión, potencia, torque, velocidad máxima y autonomía del EV; capacidad de la batería, tiempo de carga estándar, tiempo de carga rápida, vida útil y sistema de enfriamiento de la batería. También, se debe considerar la cantidad de viajes realizados, cantidad de cargas en la batería, la frecuencia de carga y el porcentaje de uso del transporte.

Se espera obtener distintos valores de energía consumida en la rueda y por el sistema de climatización, para variadas rutas preestablecidas, a través del uso de métodos y modelos matemáticos que permiten adquirir los valores para cada punto del trayecto. Además, se espera encontrar patrones de comportamiento del consumo en función de factores como la velocidad, aceleración o inclinación de la ruta.

Es importante resaltar que el modelo matemático utilizado para el consumo debido al sistema de climatización es básico y lineal, por lo que puede caer en sobre estimaciones. Además, debido a problemas en la medición de los datos de corriente y/o voltaje, se debió realizar una estimación en la eficiencia eléctrica para la obtención de la energía eléctrica en cada recorrido. Ambas situaciones afectan directamente a los valores obtenidos, por lo que puede afectar al valor energético final de cada ruta.

Capítulo 2

Antecedentes

A continuación, se van a definir conceptos, presentar modelos y métodos que permiten poner en contexto el trabajo realizado.

2.1. Vehículo eléctrico

Como bien se mencionó antes, un vehículo eléctrico es un medio de transporte impulsado por uno o más motores eléctricos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica dando paso a su movimiento, esta definición lo diferencia de un vehículo de combustión interna, pues este necesita de combustibles fósiles para accionar su motor.

El motor eléctrico, por su parte, se alimenta de energía, mediante baterías, la que primero pasa a un convertidor, que determina o establece la cantidad de potencia abastecida a los motores de accionamiento. Los ejes de estos comienzan a girar gracias a esta potencia eléctrica y, debido a que se encuentran acoplados a las ruedas del vehículo, se genera el movimiento del medio de transporte, tal como se observa en la Figura 2.1.

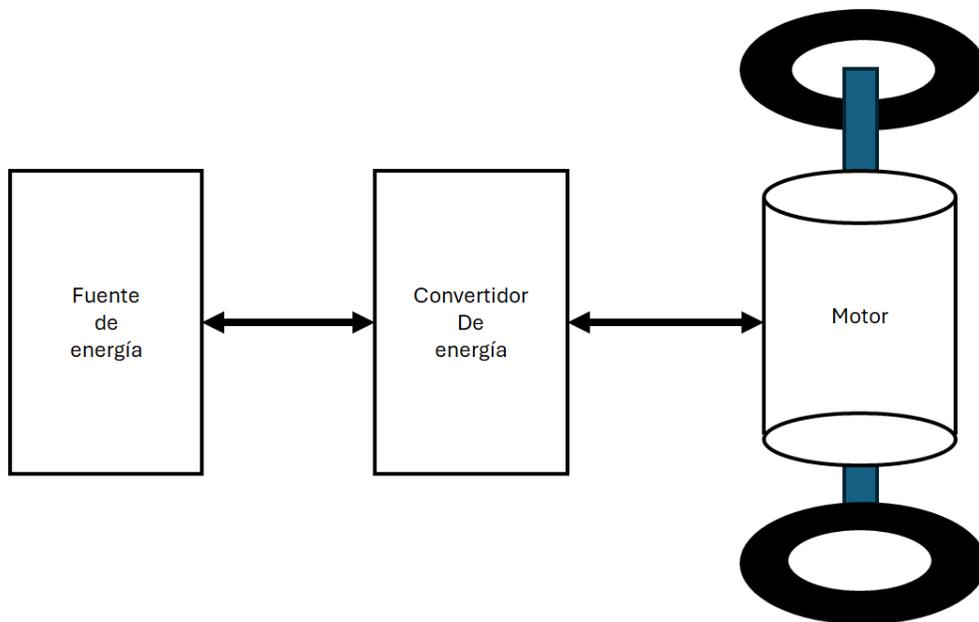


Figura 2.1: Esquema del traspaso de energía [31].

2.1.1. Tipos de vehículos eléctricos (EV)

Nour et al. (2020) [26] realiza una clasificación según el tipo de fuente del vehículo eléctrico, ésta es similar a la realizada por el Ministerio de Energía, pero agrega una categoría que efectúa una diferencia en los vehículos híbridos, la clasificación es la siguiente [26]:

- (a) Vehículos eléctricos híbridos (HEV - Hybrid Electric Vehicle): sus fuentes de energía son un motor de combustión interna y baterías que **NO** son enchufables, tal como se aprecia en la Figura 2.2a.
- (b) Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle): iguales a la categoría anterior, salvo que sus baterías son enchufables, como se puede observar en la Figura 2.2b.
- (c) Vehículo eléctrico a batería (BEV - Battery Electric Vehicle): su fuente de energía es una batería recargable por enchufe, que alimenta un motor eléctrico, tal como se observa en la Figura 2.2c.
- (d) Vehículo eléctrico con celdas de combustible (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle): es alimentado por una celda de combustible de hidrógeno, como se puede apreciar en la Figura 2.2d.

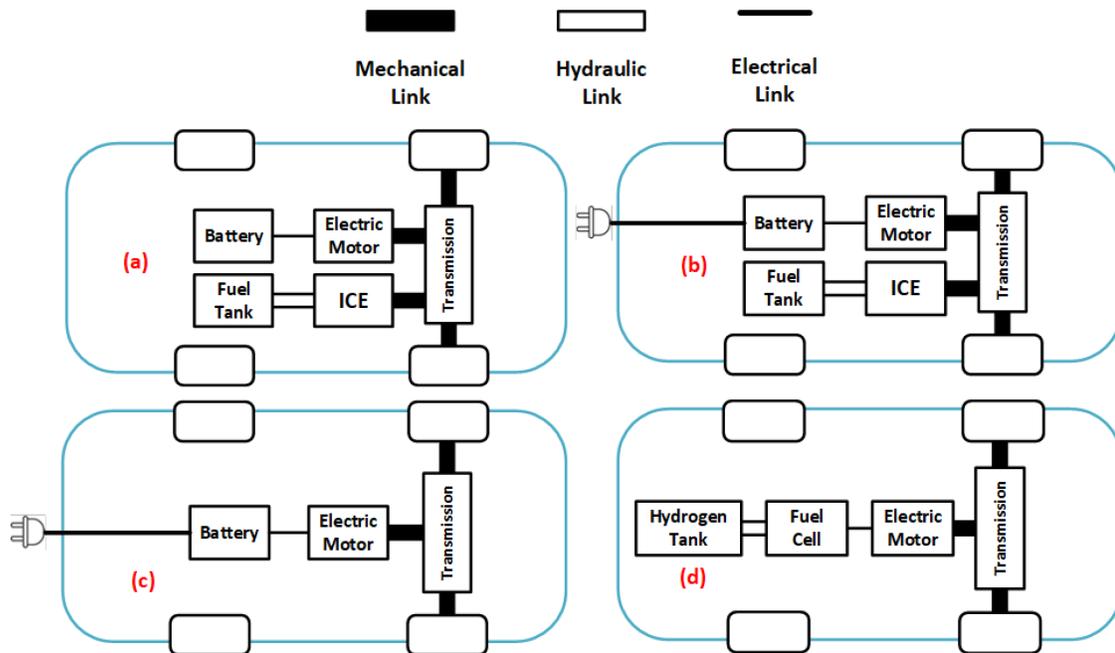


Figura 2.2: Esquema de la estructura de los distintos tipos de vehículos eléctricos [26].

2.1.2. Baterías

En el último tiempo, las baterías se han posicionado entre los dispositivos de almacenamiento de energía más útiles y prometedores para vehículos eléctricos, debido a su tecnología avanzada y participación en el mercado. Éstos dispositivos son sumamente importantes en la

comercialización de vehículos eléctricos, pues sus precios se encuentran directamente relacionados. Según Shimin et al. (2016) [31], las baterías de los EV se pueden agrupar en: baterías en base a plomo, níquel, sodio y litio.

De estas, las baterías de vehículo eléctrico comúnmente más utilizadas son las baterías de: plomo-ácido, níquel-cadmio (Ni-Cd), hidruro metálico de níquel (Ni-MH) y iones de litio. También, se utilizan baterías de Zinc-aire y de sales fundidas, sin embargo, no son comunes [31]. Más aún, las baterías de Zinc-aire aparentan tener el mejor rendimiento global y ser las mejores para aplicaciones en EVs [31], seguidas por las Ion-Litio, tal como se observa en la Figura 2.3.

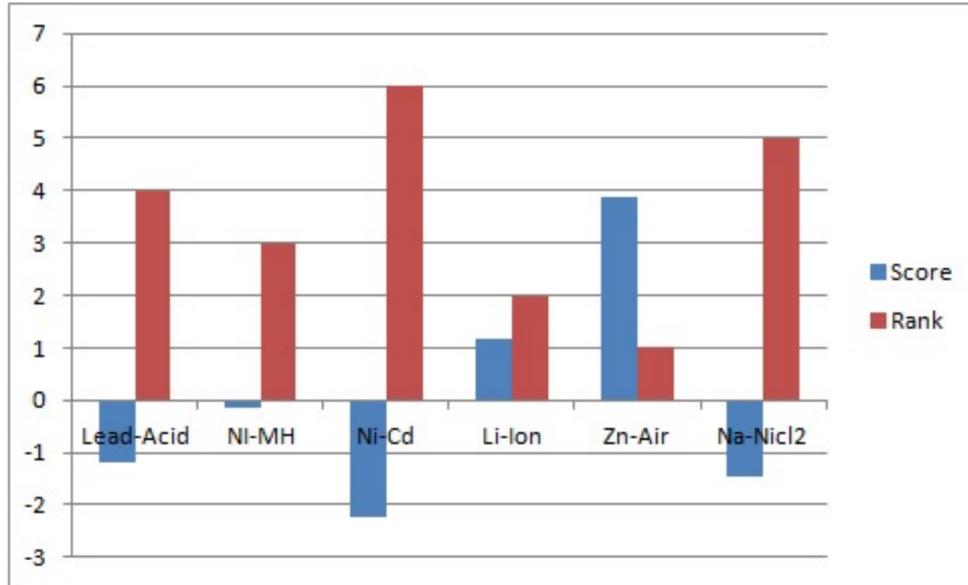


Figura 2.3: Ranking de baterías para vehículos eléctricos [26].

Además, se introduce un término ligado al estudio de las baterías, el que define cualidades y métricas que facilitan la comprensión de su comportamiento: Estado de carga (SOC: State-of-Charge) que indica, porcentualmente, la energía disponible en relación a la energía máxima que puede entregar la batería. Donde, un 100% representa que la batería se encuentra totalmente cargada, y un 0% significa que la batería está descargada.

2.2. Electromovilidad

La electromovilidad se refiere al desarrollo de sistemas de impulso o tracción que utilizan energía eléctrica aplicados a distintos medios de transporte y que, por ende, emplean el uso de los EVs. Este concepto presenta una alternativa sustentable y económicamente competitiva para reducir los efectos invernaderos causados por la industria del transporte. Según la plataforma de electromovilidad del Ministerio de Energía [24], estos son los beneficios que provee:

- Calidad del aire: un vehículo eléctrico es cero emisión, esto quiere decir que, no produce emisiones de gases ni partículas, lo que permite mejorar la calidad del aire en ciudades, pues disminuye contaminación local.

- Cambio climático: la electromovilidad utiliza la electricidad como fuente de energía, por lo tanto, no hay combustión y, por consecuencia, no se producen emisiones directas de CO_2 durante el uso del vehículo, contribuyendo en la lucha contra el cambio climático. Esto se beneficia cuando la electricidad se genera con tecnologías de cero emisión, tales como las energías renovables.
- Contaminación acústica: este medio de transporte casi no emite sonido, lo que se hace más notorio en flotas numerosas de vehículos, vehículos pesados con motores a diésel o vehículos a velocidades por sobre 50 [km/h].
- Gestión de residuos: los vehículos eléctricos no requieren lubricantes ni filtros, lo que reduce el manejo de residuos peligrosos. Además, su sistema de freno sufre menos desgaste debido a que emplean un sistema de frenos regenerativos. Para el caso de las baterías, Chile ha promulgado la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor, que regula la disposición final de las baterías y, de esta manera, evita consecuencias negativas al medio ambiente en el momento en que éstas llegan al final de su ciclo de vida.
- Eficiencia energética: un EV gasta, aproximadamente, un quinto de la energía consumida por un vehículo a combustión con las mismas características, esto se debe a las eficiencias de sus motores, con un valor por debajo del 50 % para aquellos a combustión y por sobre el 95 % para los motores eléctricos. Lo anterior, sumado a que los vehículos eléctricos recuperan energía gracias a los sistemas de frenos regenerativos, permiten que, para una misma distancia y condición, la eficiencia energética sea un ahorro económico.
- Diversificación energética: electrificar el parque vehicular implica diversificar la matriz energética en el sector del transporte, lo que permite una menor dependencia de combustibles fósiles y de la variabilidad de su precio.
- Ciudades inteligentes: la electromovilidad contribuye al desarrollo de ciudades inteligentes, es decir, un desarrollo urbano sostenible, lo que da respuesta a las necesidades de la sociedad, organizaciones y empresas, facilitando la búsqueda de una mejor eficiencia energética, la reducción de emisiones de CO_2 , un desarrollo económico y un cuidado del medioambiente.

2.2.1. Situación actual

En Chile, desde el año 2017, se han implementado políticas públicas con el objetivo de fomentar la adquisición de EVs, bajo el nombre de “Estrategia Nacional de Electromovilidad en Chile”. El impulso hacia la sostenibilidad ha sido respaldada con aumentos en la infraestructura de carga y la creación de incentivos para la compra de estos medios de transporte [28].

El estado chileno no es el único en realizar esfuerzos por fomentar el cambio, la empresa Enel, bajo su línea de negocio Enel X, presentó, a inicios de 2020, el proyecto de electromovilidad más ambicioso de América Latina: “ElectroRuta”. Esta propuesta contempla la instalación de 1.200 puntos de carga en todo Chile hasta 2025, los que permitirán recorrer más de 5.000 kilómetros, de Norte a Sur, dando por garantizado la autonomía y continuidad de circulación de los vehículos eléctricos, lo que proyecta un cargador cada 60 kilómetros [14].

Según cifras oficiales de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC A.G), las ventas de los EVs registraron un aumento del 35 % durante 2023, convirtiéndose así en la

mejor venta acumulada anual en la historia. De estos vehículos, los modelos BEV y PHEV incrementaron en un 22,6 % y 6,8 %, respectivamente. Además, se incrementó en un 308,9 % la venta de buses eléctricos, gracias a la incorporación de autos eléctricos al sistema RED [28].

Sin embargo, no todo son buenas noticias, de acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadísticas, de los 6.251.852 permisos de circulación que se entregaron durante el 2022, solo 8.799 fueron para EVs, es decir, menos del 0.15 % [5]. Un porcentaje muy inferior al que indicó el Ministerio de Energía, que propuso que las ventas del 2035 fuesen solo vehículos eléctricos y, de esta manera, llegar a 2050 con un 40 % de la matriz privada de transporte impulsado por electricidad.

El principal obstáculo que tiene el área privada para adquirir vehículos eléctricos es el costo que éstos tienen, donde el EV más barato en Chile cuesta \$ 15.000.000, exactamente el doble del valor que presenta el popular Suzuki S Presso. A día de hoy, solo hay programas que subvencionan la compra de taxis y colectivos eléctricos, pero nada respecto a vehículos privados [5].

A nivel mundial, se espera que este año distintos fabricantes de renombre presenten modelos eléctricos con características innovadoras y tecnologías de vanguardia. Este desarrollo, sumado al hecho de que la Generación Z (1997-2012), que representa un cuarto de la población mundial y casi un 75 % de la fuerza laboral, se inclina significativamente hacia la adquisición de vehículos eléctricos [2], configuran un futuro emocionante para la movilidad eléctrica en el país.

2.3. Vehículo en estudio

El vehículo que forma parte del estudio corresponde a la marca Hyundai, modelo Ioniq 2019 EV. A continuación, se presenta el EV con sus medidas:

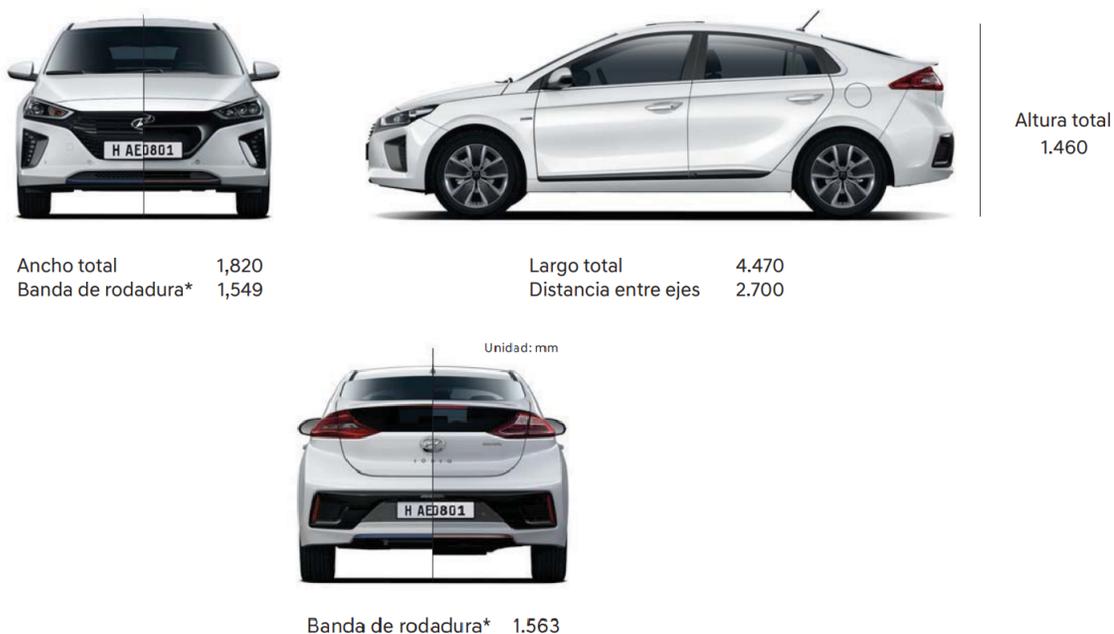


Figura 2.4: Vistas delantera, lateral y trasera del Hyundai Ioniq 2019 [17].

Además, se presenta un resumen de su ficha técnica se puede observar en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Ficha técnica del EV Hyundai Ioniq 2019 [18].

Ficha técnica Hyundai Ioniq 2019 EV.	
Motor eléctrico	Sincrónico de imán permanente
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	1970

2.4. Sistema de climatización

Con el objetivo de tener una visión más clara del efecto en el consumo energético que tiene el sistema de climatización de un vehículo eléctrico, se realizará una explicación de como opera este sistema. En primer lugar, se debe indicar que consta de dos partes: sistema de enfriamiento y de calefacción. El primero, es prácticamente igual, en un EV, a los transportes

de combustión interna, sin embargo, el segundo se diferencia debido a la ausencia del calor generado por el motor a combustión. El funcionamiento de cada uno se presenta a continuación.

2.4.1. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento, también llamado aire acondicionado, mantiene la misma lógica y estructura para la mayoría de los vehículos, y corresponde a un conjunto de equipos que permiten enfriar una masa de aire. La versión más simple de estos sistemas cuentan, por lo general, con cuatro componentes: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador [34].

Además, se debe considerar que estos sistemas utilizan un fluido de trabajo (refrigerante) cuyas propiedades térmicas facilitan el cambio de temperatura para bajos flujos de calor entregados, lo que permite que los sistemas de refrigeración sean menos costosos. Típicamente, los fluidos utilizados son el R134a, R744 y R123yf, el último es más nuevo y menos nocivo, pero, más inflamable. A continuación, se realiza una breve explicación del trabajo que realiza cada componente del aire acondicionado y el esquema se puede observar en la Figura 2.5.

- **Compresor eléctrico:** este equipo tiene como principal función comprimir el refrigerante, lo que aumenta su presión y temperatura. En el caso de vehículos de combustión interna, la alimentación energética se encuentra asociada a la combustión, sin embargo, para los EVs, la fuente de energía es mediante corriente eléctrica. Es el componente de mayor consumo dentro del sistema.
- **Condensador:** el refrigerante llega a un intercambiador de calor de tubos y aletas, lo que permite bajar la temperatura de éste mediante el aire frío que fluye a través de los tubos y aletas, también se cuenta con un ventilador para aportar en esto. El ventilador funciona con corriente eléctrica, y su consumo energético se considera despreciable en comparación al del compresor.
- **Válvula de expansión:** Este componente es capaz de generar la caída de presión, del refrigerante, necesaria entre el condensador y el evaporador, lo que entrega un fluido de baja temperatura y baja presión.
- **Evaporador:** En términos generales, realiza el mismo proceso que el condensador, con la diferencia de que, este intercambiador de calor, enfría el aire de la cabina del vehículo, lo que hace que el refrigerante salga en estado gaseoso y vuelva al compresor para iniciar nuevamente el ciclo. Aquí también hay ventiladores, que ayudan en la función, y su consumo se considera despreciable. Es en este equipo donde el aire de la cabina se enfría y es enviado al interior.

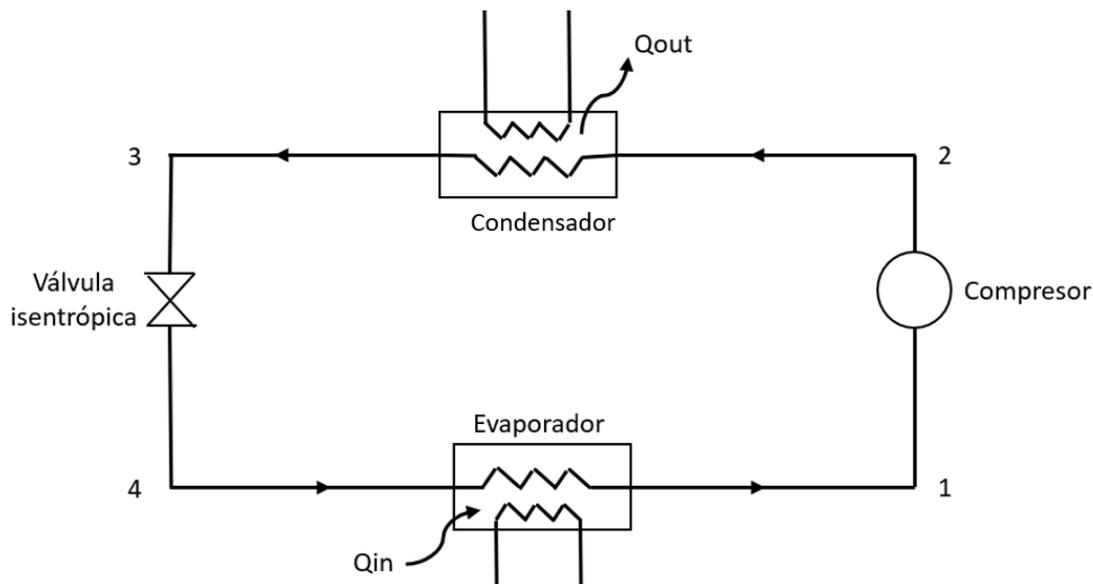


Figura 2.5: Esquema del sistema de refrigeración, ciclo del refrigerante.

2.4.2. Sistema de calefacción

Existen distintos métodos mediante los cuales los vehículos eléctricos pueden calentar el aire que va hacia la cabina, el más común es utilizar resistencias eléctricas o bombas de calor para aumentar la temperatura del aire [29] que finalmente llega a la cabina.

En el caso de las resistencias, se aprovecha el calor generado por estas para calentar el fluido de trabajo del sistema de climatización, el que, tal como se observó en el de enfriamiento, terminará por realizar un intercambio térmico con el aire que entrará al habitáculo. El problema de este método recae en la ineficiencia energética que posee con respecto a la batería, pues se le debe proporcionar energía, lo que afecta a la autonomía del vehículo.

Por otro lado, existen EVs que utilizan bombas de calor para calentar el líquido del sistema de calefacción, este equipo no controla solamente la temperatura al interior de la cabina, sino que puede generar tanto calor como frío, además de controlar la temperatura de la batería del vehículo [19]. De esta forma, logra evitar que la fuente de energía del automóvil se someta sin protección ante temperaturas muy altas o bajas, con el desgaste que esto conlleva para la eficiencia.

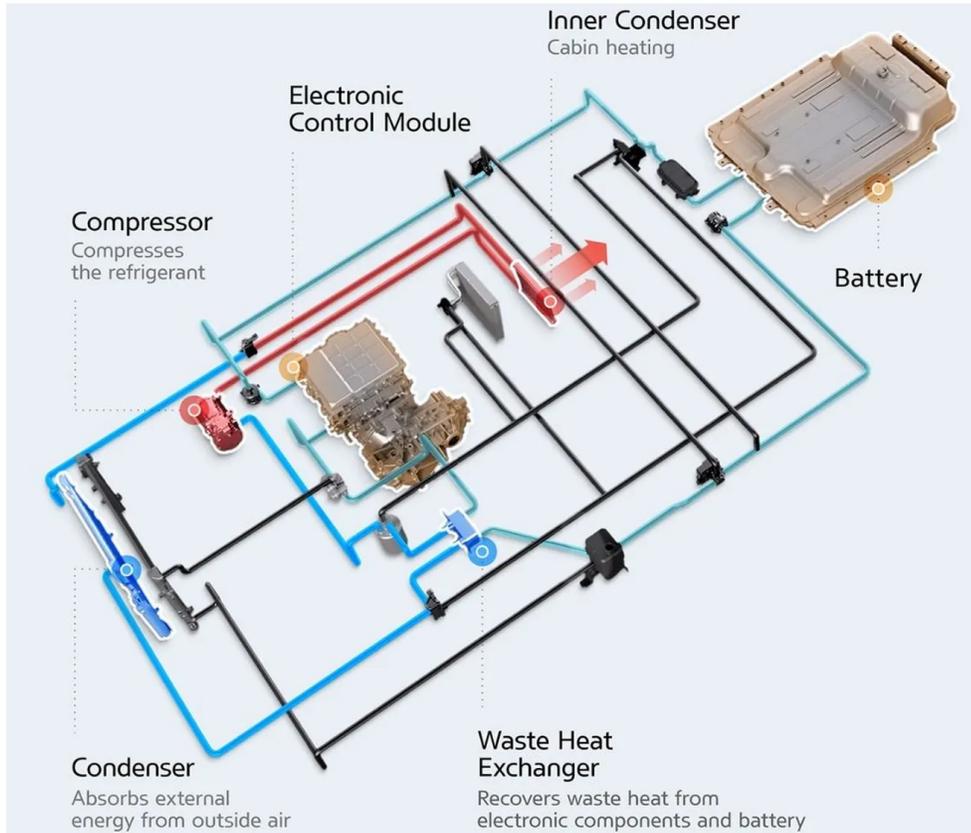


Figura 2.6: Esquema del sistema con bomba de calor [15].

2.4.3. Modelo lineal para estimar el consumo del sistema de climatización

Existen distintos métodos o modelos que permiten estimar la potencia consumida por el aire acondicionado. Entre ellos, Mebarki et al. (2013) [22] presenta un estudio que posibilita calcular el impacto del sistema de climatización en el consumo del vehículo eléctrico.

En el modelo propuesto se determina que la potencia total de un EV puede descomponerse en dos subsistemas: la potencia en la cadena de tracción, o potencia en la rueda, P_{TC} y la potencia del sistema de aire acondicionado P_{AC} [22]. Por lo tanto, la potencia total en cada instante de tiempo puede obtenerse mediante la ecuación 2.1.

$$P_T = P_{TC} + P_{AC} \quad (2.1)$$

Para el modelo planteado, se indica que la batería debe alimentar los dos subsistemas mediante la siguiente distribución:

- El sistema de tracción del vehículo, con una potencia que varía entre 20 y 47 kW.
- El sistema de confort térmico, con una potencia entre 1 y 5 kW.

La investigación lleva a cabo simulaciones de un sistema de aire acondicionado en un vehículo eléctrico a través del software Matlab Simulink, donde el ciclo actúa bajo distintas condiciones climáticas representadas mediante distintas temperaturas ambientales, tal como

se observa en la Tabla 2.2, con su respectiva evolución en la Figura 2.7, donde es posible apreciar la variación de la potencia del sistema de climatización P_{AC} .

Tabla 2.2: Diferentes condiciones climáticas [22].

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

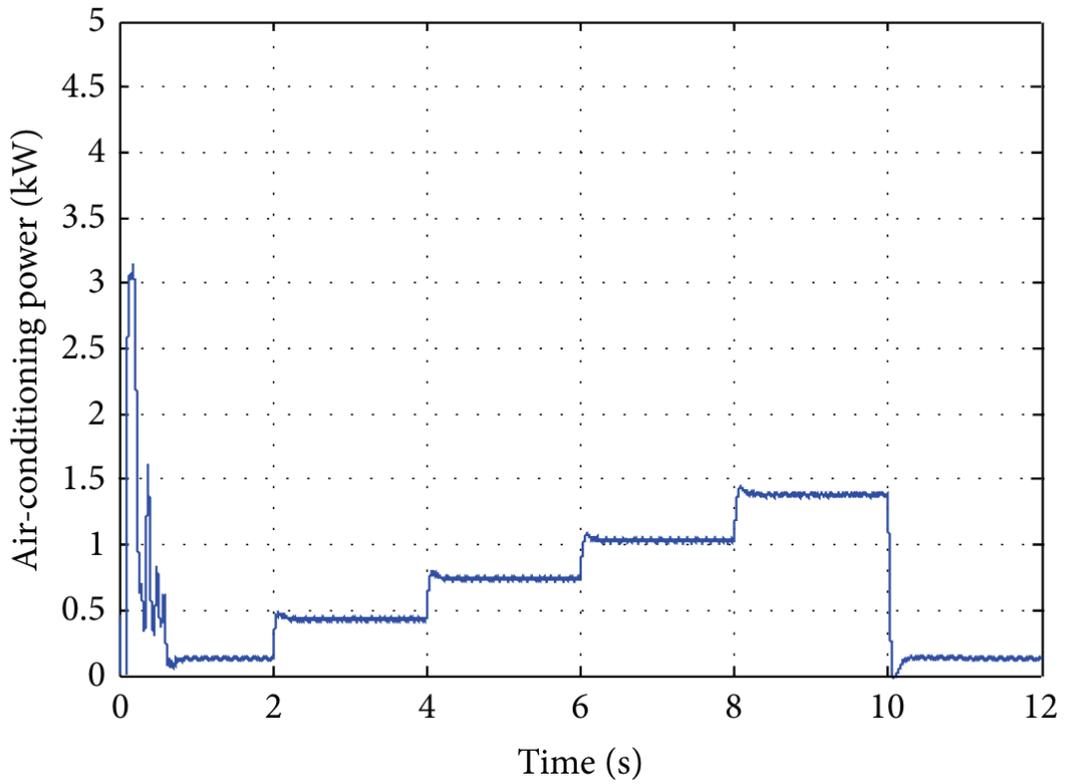


Figura 2.7: Evolución de la potencia del sistema de climatización ante diferentes condiciones climáticas [22].

La simulación realizada en este estudio permite determinar que la potencia del sistema de climatización a través del tiempo presenta un comportamiento lineal ante diferentes condiciones climáticas. Por lo tanto, esta potencia P_{AC} se puede calcular como:

$$P_{AC} = a \cdot T_{out} + b \quad (2.2)$$

Donde T_{out} es la temperatura ambiente y a , b son constantes que se deben determinar a través de las siguientes condiciones de borde:

- La temperatura de la cabina se mantiene constante en la temperatura de confort establecida a 24 °C.
- El sistema de aire acondicionado está apagado cuando la temperatura ambiente T_{out} es menor o igual a la temperatura de confort, es decir, $P_{AC}(T_{out} \leq 24^{\circ}C) = 0$.
- Cuando la temperatura externa es mayor a la temperatura de confort, se utiliza el caso extremo, este corresponde a una temperatura ambiente igual al mayor valor histórico para la ciudad en donde se está aplicando el modelo. En el caso de la ciudad de Santiago, este corresponde a 38.3°C [11]. En ese punto se utiliza la potencia máxima disponible, es decir, $P_{AC} = P_{max} = 5$ kW.

Utilizando lo anterior, el modelo lineal para la ciudad de Santiago corresponde a [27]:

$$P_{AC} = 0.35 \cdot T_{out} - 8.4 \quad (2.3)$$

2.5. Estado de carga SOC

Con el objetivo de comparar un EV con aquellos de combustión interna, se debe tener conocimiento del consumo total del vehículo. La energía utilizada en un viaje se puede estimar mediante una comparación de los estados de carga (SOC) del banco de baterías en el comienzo y el final. La expresión de la energía consumida en el viaje corresponde a:

$$E_{viaje} = C_B \cdot (SOC_f - SOC_i) \quad (2.4)$$

Donde:

- E_{viaje} indica la energía total consumida en el viaje en [J] o [kWh].
- C_B indica la capacidad de carga total de la batería.
- SOC_f es el estado final de carga de la batería.
- SOC_i es el estado inicial de carga de la batería.
- Se asume la descarga de la batería como un proceso lineal.

El estado de carga fue introducido anteriormente y su símil, en vehículos de combustión interna, sería el medidor de combustible. Como bien se mencionó, el SOC se encarga de comunicar el estado de la batería y, de esta manera, evita problemas con su sobrecarga y descarga. Mebarki et al. (2013) [22] presenta una forma de calcular el estado de carga en el tiempo:

$$SOC = \int_{t_0}^t \frac{I_{batería}(t) \cdot dt}{Q_0} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

Donde Q_0 es la carga total de la batería e $I_{batería}$ la carga de corriente de la batería. Existe una manera alternativa de calcular el estado de carga [35] y corresponde a:

$$SOC = \frac{Q_c}{Q} \cdot 100 \% = 100 \% - \frac{Q_e}{Q} \quad (2.6)$$

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.

2.6. Modelos existentes

Según el análisis de los datos realizado por Wu et al. (2015) [33], se establece la hipótesis de que puede existir una relación entre la elección de ruta, que hace un conductor, y el tráfico o las condiciones climáticas. Sin embargo, el mismo estudio llega a la conclusión de que no hay datos que acrediten que esto sea así, muy por el contrario, al realizar una entrevista al conductor, se determinó que, entregar un feedback del consumo energético al usuario puede ayudar a que éste tome mejores decisiones que den como resultado un buen trade-off entre el tiempo del viaje y la energía consumida. Cabe destacar que existen distintos factores que afectan al consumo energético y este modelo intenta discutirlos e incorporarlos de una u otra manera.

2.6.1. Eficiencia energética de un EV

La eficiencia energética, en el estudio de Wu et al. (2015) [33], se define como los kilowatt-hora necesarios para recorrer 100 millas [kWh/100 millas] y mientras menor sea el valor, más eficiente es. También, indica que existe una diferencia, entre un vehículo eléctrico y uno de combustión interna, respecto al comportamiento de este factor en función del tipo de ruta recorrido.

El estudio llega a la conclusión de que, al contrario de lo que ocurre en un vehículo de combustión interna, un EV es bastante más eficiente, energéticamente, en rutas urbanas (in-city) que en carreteras (freeway). Conclusión que fue verificada a través del análisis de los 167 viajes medidos.

Sumado a lo anterior, se verificó que la eficiencia energética mejoraba con el paso del tiempo, pues, al realizar un análisis diario el número de kilowatt-hora utilizados en el mismo día y distancia disminuían, fenómeno que fue atribuido al feedback proporcionado al conductor.

2.6.2. Rendimiento de un EV

Para comprender de mejor manera el rendimiento del vehículo eléctrico a lo largo del estudio, se decidió investigar la relación entre la potencia, velocidad, aceleración y el ángulo del camino. Para tener mejores resultados, el estudio dividió o categorizó las rutas en viajes dentro de la ciudad y en carretera. Los resultados obtenidos y las conclusiones respecto al efecto de cada factor en la potencia del vehículo eléctrico se presentan a continuación [33].

- Efecto de la velocidad sobre la potencia: se indica que, en primer lugar, al aumentar la velocidad, aumenta la potencia requerida y, en segundo lugar, se requiere mayor potencia en carreteras que en ciudad para una misma velocidad, como se observa en las figuras 2.8a y 2.8b.
- Efecto de la aceleración sobre la potencia: se indica que existe un rango de aceleración en el cual, la potencia, se comporta de manera proporcional a este factor. Además, cuando la aceleración es negativa la potencia también lo es, lo que se debe al sistema de recuperación de energía al frenar, como se puede apreciar en las figuras 2.8c y 2.8d.

- Efecto de la inclinación sobre la potencia: se indica que la potencia requerida aumenta drásticamente en subida (ángulo positivo), cuando se compara con la bajada (ángulo negativo). Esto, probablemente, se debe a que al ir en bajada es común que se deje de acelerar, en cambio, en subida se trata de mantener cierta velocidad, lo que exige mayor potencia al aumentar la inclinación, como queda plasmado en las figuras 2.8e y 2.8f.

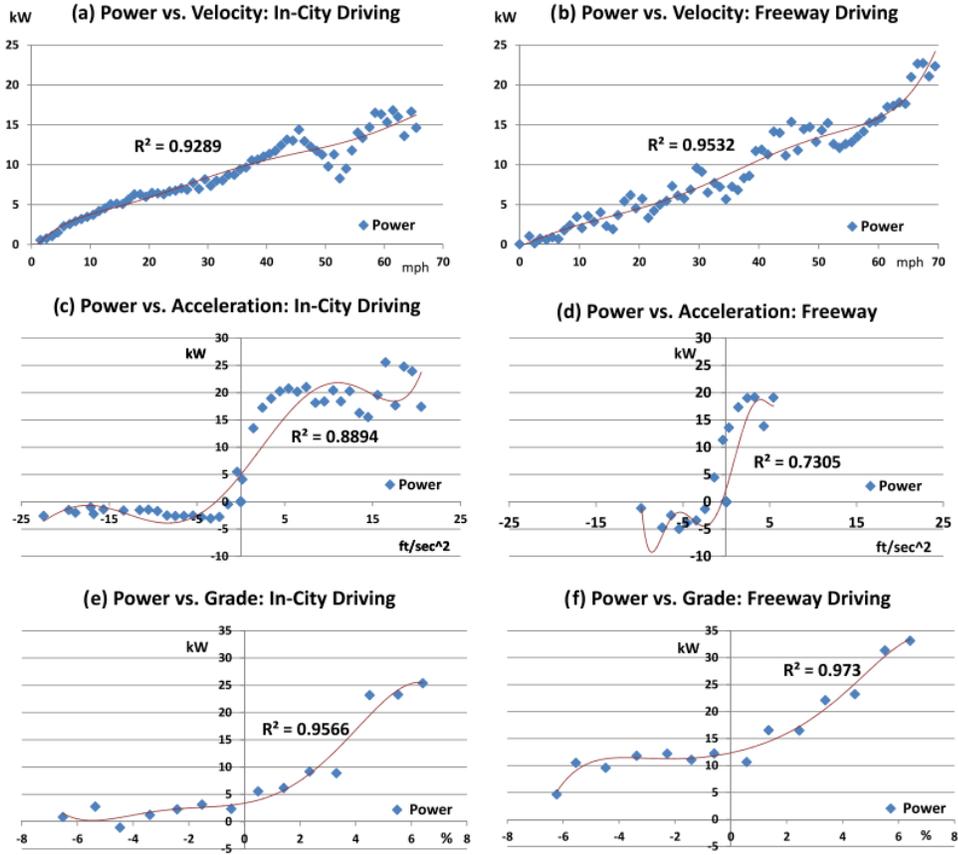


Figura 2.8: Comportamiento de cada factor vs la potencia [33].

2.6.3. Consumo mecánico o de tracción

Wu et al. (2015) y Fiori et al. (2016) proponen un modelo analítico para la estimación de la potencia. Según la teoría fundamental de la dinámica de un vehículo, y lo discutido anteriormente, se sabe que la potencia instantánea de los vehículos eléctricos está determinada por la velocidad, la aceleración y la inclinación del camino, por lo tanto, se propone una descripción analítica de la relación entre estos factores.

En primer lugar, según la física básica, el esfuerzo de tracción, requerido para la conducción de un vehículo eléctrico en determinadas condiciones, se encuentra definido por tres resistencias principales, tal como se indica en la siguiente ecuación [33]:

$$F = ma + R_a + R_{rl} + R_g \quad (2.7)$$

Donde F es el esfuerzo de tracción, en Newton [N]; m es la masa del vehículo, en kilogramos [kg]; a es la aceleración, metros por segundo al cuadrado [m/s^2]; R_a , R_{rl} y R_g son las

resistencias aerodinámica, a la rodadura y de grado, respectivamente, en Newton [N]. Estas resistencias pueden ser calculadas como:

$$R_a = k \cdot v^2 = \frac{\rho}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 \quad (2.8)$$

$$R_{rl} = f_{rl} \cdot m \cdot g \quad (2.9)$$

$$R_g = m \cdot g \cdot \sin\theta \quad (2.10)$$

Donde k es la constante de resistencia aerodinámica, la que es determinada por: la densidad del aire ρ , en kilogramos por metro cúbico [kg/m^3]; el área frontal del vehículo A_f , en metros cuadrados [m^2] y el coeficiente de arrastre C_D . También, se tienen las variables v correspondiente a la velocidad, en metros por segundo [m/s]; f_{rl} es la constante de resistencia a la rodadura; g es la aceleración de gravedad, cuyo valor es de 9.81 [m/s^2]; y θ es el grado de inclinación de la ruta, en grados.

Por otro lado, la potencia instantánea de un vehículo eléctrico puede ser estimada mediante [16]:

$$P_{Wheel} = F \cdot v \quad (2.11)$$

$$P_{Wheel} = (m \cdot a + f_{rl} \cdot m \cdot g + \frac{\rho}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin\theta) \cdot v \quad (2.12)$$

Donde P_{Wheel} es la potencia, en watt [W] y la aceleración se obtiene mediante [32]:

$$a_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (2.13)$$

Finalmente, para estimar el consumo en un viaje, se obtiene la energía utilizada (E) mediante la integral de la potencia dentro del tiempo que éste dura:

$$E = \int_0^T P(t) dt \quad (2.14)$$

Este modelo, presenta un error absoluto promedio máximo de 15.6% [33], lo que se debe a que falta calibrar los parámetros utilizados y mejorar la exactitud de aquellos que fueron supuestos en base a la bibliografía. Al realizar esta corrección, la precisión del método puede mejorar.

Si bien este modelo estima el consumo energético en función del tiempo y no de la posición, como se busca en el presente trabajo de título, funciona como un método efectivo para conocer la energía consumida punto a punto.

2.6.4. Consumo eléctrico

La potencia eléctrica es un parámetro que indica la cantidad de energía eléctrica transferida de una fuente generadora a un elemento consumidor por unidad de tiempo [4].

En el contexto del presente trabajo, la potencia eléctrica en la batería del vehículo eléctrico

se puede estimar utilizando la siguiente ecuación [20]:

$$P_{Elec} = R \cdot I^2 = V \cdot I \quad (2.15)$$

Donde P corresponde a la potencia eléctrica, R la resistencia, V el voltaje e I la corriente de la batería. Esta ecuación permite obtener la potencia instantánea para cada punto del recorrido que realiza un EV, es decir, indica la tasa de consumo o generación de energía en un momento específico.

Al aplicar la ecuación 2.14, es posible obtener la energía eléctrica consumida en un recorrido, lo que proporciona una medida acumulativa de la energía consumida durante el viaje del vehículo eléctrico.

Obtener la energía eléctrica para cada tramo es de suma importancia pues permite realizar estudios relacionados al consumo del vehículo, encontrar rutas o rangos de velocidades en las que se presente mayor o menor consumo, observar lo que ocurre en ascenso o descenso y, con esto, estimar la autonomía que pueden presentar los EVs, tal como las conclusiones de Achariyaviriya et al. (2023) [1].

2.6.5. Eficiencia del motor eléctrico

La eficiencia del motor eléctrico se define como la relación existente entre la potencia de salida y la de entrada. En otras palabras, la energía mecánica de salida, dividida en la energía total de entrada, en este caso eléctrica, ambas deben estar en la misma unidad de medida.

La potencia mecánica de salida es, en todas las ocasiones, menor a la potencia eléctrica de entrada. Esto ocurre debido a las pérdidas existentes en la conversión de energía eléctrica a mecánica, tales como fricción o calor [30]. Son precisamente estas pérdidas las que se buscan minimizar al momento de diseñar el motor eléctrico.

Es evidente que, mientras mayor sea el valor de la eficiencia del motor, menores son las pérdidas existentes en la conversión de energía, lo que entrega una mayor potencia mecánica de salida. Ésta relación se puede calcular mediante [8]:

$$\eta_{Mot,elec} = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \quad (2.16)$$

Al adaptar la ecuación 2.16 al contexto del presente trabajo, se obtiene lo siguiente:

$$\eta_{Mot,elec} = \frac{P_{Wheel}}{P_{Elec}} \quad (2.17)$$

Existen distintos motores con diferentes eficiencias en los vehículos eléctricos, entre ellas se destaca la del Nissan Leaf, con un valor que varía entre 85 % y 95 % según indica Fiori et al. (2016) [16], donde además menciona que una eficiencia del 91 % minimiza el error promedio entre los datos empíricos y valores estimados del consumo de energía.

2.7. Polinomio de interpolación de Lagrange

La interpolación es una técnica numérica muy utilizada en el sub-campo del análisis numérico que se utiliza para agregar nuevos puntos de datos dentro del rango de un conjunto de puntos de datos conocidos y, de esta manera, acercarse lo más posible al comportamiento de una función en aquellos lugares en los que se desconoce su valor. En otras palabras, permite obtener el resultado de una función a partir de un conjunto de datos conocidos [21].

Es posible usar la interpolación para rellenar datos faltantes, suavizar datos existentes y hacer predicciones, entre otras cosas.

Existen distintos métodos para interpolar, en particular, el polinomio de interpolación de Lagrange es simplemente una reformulación del polinomio de Newton que evita el cálculo de las diferencias divididas, y se representa mediante [9]:

$$f_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i f(x_i) \quad (2.18)$$

donde

$$L_i(x) = \prod_{j \neq i} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (2.19)$$

donde $i \neq j$ y \prod representa “el producto de”.

Dado lo anterior, el polinomio de Lagrange de primer orden corresponde a:

$$f_1(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} f(x_0) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} f(x_1) \quad (2.20)$$

Y, en el caso del polinomio de Lagrange de segundo orden se tiene:

$$f_2(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} f(x_0) + \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} f(x_1) + \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} f(x_2) \quad (2.21)$$

En la Figura 2.9 se muestra un caso del polinomio de Lagrange de segundo grado. Donde cada término de la ecuación 2.21 pasa por uno de los tres puntos conocidos, que se tienen como datos, y es cero en los otros dos. Con esto, la suma de los tres términos debe ser el polinomio único de segundo grado $f_2(x)$ que pasa exactamente por los tres puntos.

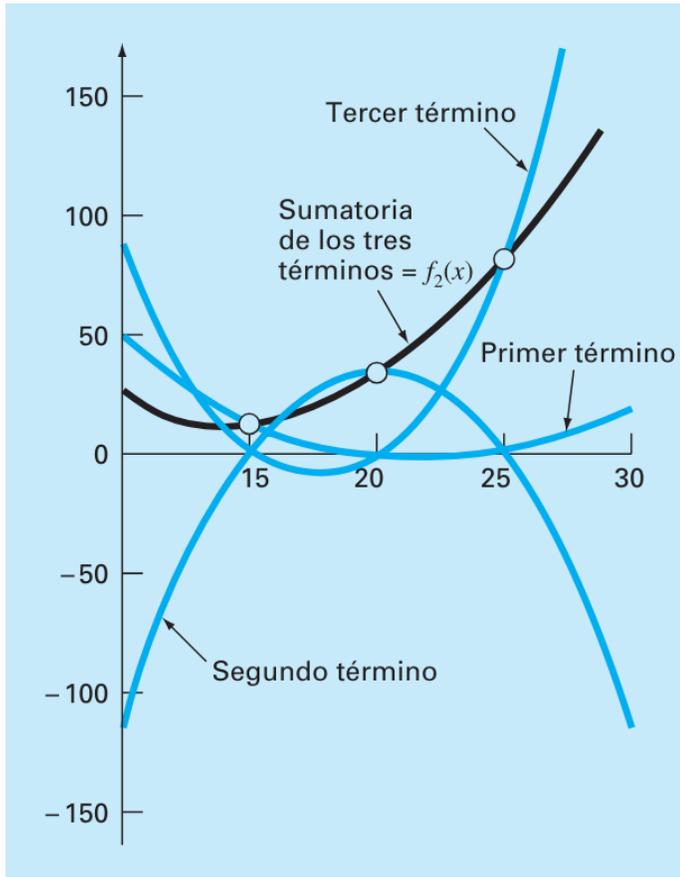


Figura 2.9: Descripción visual del razonamiento detrás del polinomio de Lagrange de orden 2 [9].

Capítulo 3

Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos principales y secundarios del presente trabajo, se debe definir una ruta que facilite el correcto desarrollo de cada tarea. Para esto, es necesario comprender cada línea de trabajo y el efecto que tienen en este estudio. A continuación, se expone un desglose, desde un nivel general hacia otro más específico, del camino o conjunto de labores que permiten llevar a cabo esta investigación.

3.1. Ruta empleada

En la Figura 3.1, se presenta la metodología, a grandes rasgos, empleada durante el desarrollo de este estudio. Cada etapa será brevemente descrita para tener una visión más clara de la elaboración del trabajo.

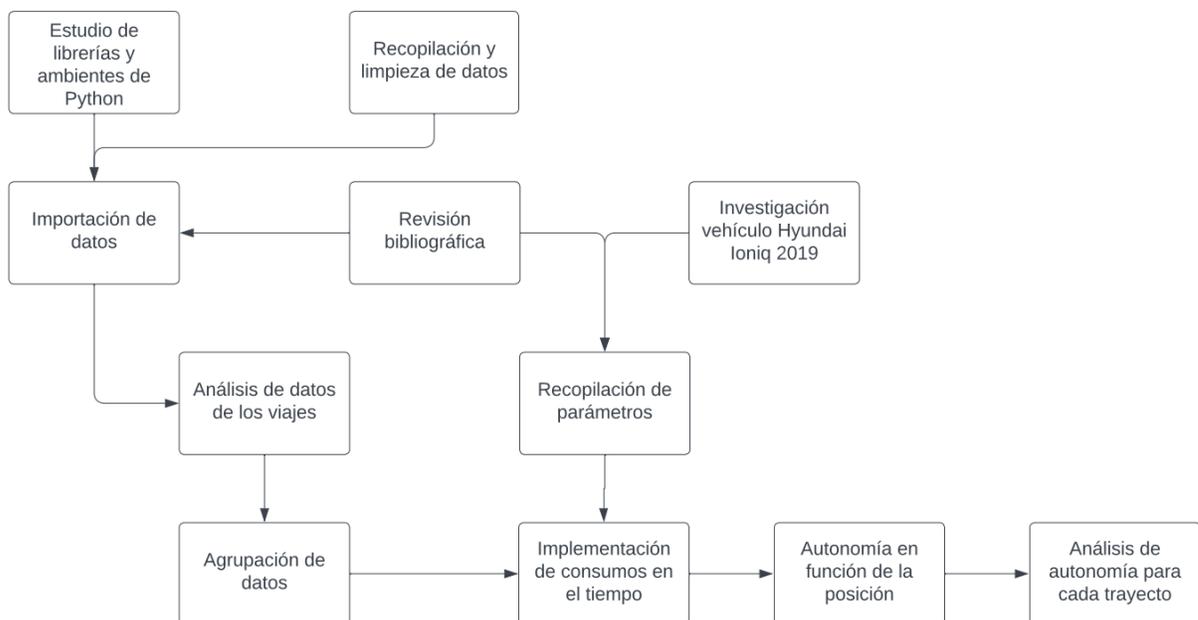


Figura 3.1: Etapas a seguir para el desarrollo del presente trabajo.

- Recopilación y limpieza de datos: durante 2020 se realizó la adquisición de datos donde se recopilaron los siguientes valores: temperatura ambiente, estado de la carga (SOC), velocidad, posición, corriente, voltaje, fecha y hora, entre otras cifras. Además, se consideran

otros factores como distancias y pendientes recorridas, cantidad de viajes realizados, tipo de operación, rendimiento y vida útil reales observados.

Posteriormente, se procesaron y limpiaron los datos para permitir la generación de información de la operación. Lo que dio como resultado vehículos con lecturas útiles para su manejo. Este proceso es realizado por integrantes del proyecto Ruta sustentable.

- Estudio de librerías y ambientes de Python: una vez establecida la idea de utilizar un software de licencia libre, se profundiza el estudio del lenguaje Python, incluyendo las distintas librerías que facilitan el manejo de las mediciones de forma adecuada y permiten realizar agrupaciones de datos, iteraciones, cambios de formatos, utilizar funciones matemáticas, entre otros usos. De esta manera, se obtuvo el conocimiento necesario para manipular la información recopilada adecuadamente. Entre todas estas destacan Pandas, Numpy, Matplotlib, entre otros.
- Revisión bibliográfica: la revisión bibliográfica se realiza para obtener información de los temas pertinentes, comprender las definiciones y fundamentos del área, para establecer las bases de ciencia e ingeniería. Lo anterior, constituye los cimientos sobre los cuales se construye el conocimiento y la fundamentación teórica del estudio, permitiendo contextualizar la investigación dentro del marco conceptual adecuado. Además, profundiza en el estado del arte del estudio.

Es importante tener en cuenta que esta etapa se realiza, en su mayor parte, al inicio de todo el proceso, sin embargo, es una tarea que se extiende a lo largo del desarrollo del trabajo.

- Importación de datos: una vez establecidas las bases teóricas del estudio y adquirido un conocimiento más profundo sobre las librerías y entornos del software de licencia libre Python, se procede a importar los datos recopilados. Estos fueron previamente limpiados y almacenados en formato CSV durante la etapa de recopilación y limpieza.

Para procesarlos se utilizan librerías y funciones disponibles en Python, lo que permite la lectura del archivo y su manipulación mediante el uso de DataFrames. El objetivo de este proceso es observar el comportamiento de los viajes realizados y utilizar la información para efectuar cálculos acordes al contexto del trabajo planteado.

- Investigación vehículo Hyundai Ioniq 2019: esta etapa se realiza en paralelo a la revisión bibliográfica, obteniendo información crucial de la flota de taxis utilizados en la adquisición de datos. La investigación se centra en recopilar características del Hyundai Ioniq 2019, tales como el tipo de vehículo eléctrico, sus dimensiones, su potencia, torque, velocidad máxima, la autonomía, tipo de batería, peso, entre otras relevantes para el estudio.

Es importante añadir que este EV incluye un sistema de regeneración de energía al freno, lo que le permite optimizar su eficiencia energética. Además, fue necesario recurrir a datos de otro modelo eléctrico: el Nissan Leaf, para completar la información útil para el trabajo.

- Análisis de datos de los viajes: en esta etapa se lleva a cabo un estudio y análisis detallado de los datos obtenidos. Estos se categorizarán en viajes según diferentes criterios, los que incluyen la distancia del trayecto, la ubicación geográfica del recorrido, la duración del viaje y los puntos de origen y destino. Mediante Python, se obtiene una mejor comprensión de la data recopilada, además de proporcionar información más clasificada para la posterior agrupación de datos.
- Agrupación de datos: esta sección permite separar los viajes de cada vehículo eléctrico en trayectos, los que corresponden a recorridos más cortos que un viaje, en los que se tienen puntos de origen y destino definidos. Para realizar esto se utiliza el software gratuito Google Earth y, posteriormente, aquellas rutas similares que comparten ubicación de inicio y final se agrupan con la idea de observar y analizar, en etapas siguientes, el comportamiento del consumo de cada camino encontrado.
- Recopilación de parámetros y ecuaciones: una vez completada la importación de datos, la revisión bibliográfica y la investigación del vehículo Hyundai Ioniq 2019, se procede a recopilar todos los valores, parámetros y ecuaciones necesarios para la implementación del modelo de consumo.

Estos incluyen velocidades, aceleraciones, ubicaciones geográficas y tiempos registrados en los datos recopilados, así como la masa del vehículo, área frontal y todo tipo de resistencias al movimiento adquiridas en la segunda y tercera etapa de las mencionadas. Además, se recolectan las ecuaciones requeridas para calcular diferencias de tiempos, elevación, distancias, consumo y energía, obtenidas a partir de la revisión bibliográfica.

- Implementación del modelo de consumo en el tiempo: una vez completadas las etapas de recopilación de parámetros y agrupación de datos, es posible implementar el modelo de consumo a cada uno de los trayectos identificados, utilizando los valores, parámetros y ecuaciones previamente adquiridas.

En esta etapa se obtiene la potencia en la rueda, en la batería y aquella ligada al sistema de climatización, para integrarlas en el tiempo y obtener las energías respectivas en kilowatt-hora (kWh).

- Autonomía en función de la posición: al conocer el valor de la energía en la rueda, en la batería y la asociada al sistema de climatización para cada trayecto, se procede a graficar cada una en función de la posición, de esta manera es posible observar la autonomía del vehículo eléctrico en función de la posición o distancia recorrida, tarea que da paso al análisis de cada recorrido.
- Análisis de autonomía para cada trayecto: por último, una vez se finalizadas todas las etapas anteriores, se procede a realizar un análisis al consumo del vehículo eléctrico en función de la posición, donde se vuelve relevante las pendientes de las curvas, el efecto de la inclinación o la velocidad, entre otros factores.

El objetivo de esta etapa es comprender el comportamiento de la autonomía de vehículo eléctrico en la ciudad de Santiago de Chile y entregar un consumo aproximado para cada uno de los trayectos definidos.

3.2. Procesamiento de datos y cálculos realizados

A continuación, se proporcionan más detalles respecto a la metodología empleada y descrita anteriormente, con un enfoque más profundo de las tareas realizadas.

3.2.1. Manejo de datos

Respecto al manejo de los datos, se tienen tres principales características que se deben extraer para proceder al análisis de los datos. Estas corresponden a la distancia entre los puntos, la inclinación entre los datos y el espacio temporal entre ellos.

Distancia entre puntos:

Para conocer la distancia que existe entre los puntos medidos se utiliza el módulo de Python: Haversine, el que contiene una función con el mismo nombre. Esta permite calcular la distancia, en distintas unidades, entre dos puntos de la tierra, utilizando sus latitudes y longitudes. Luego, la totalidad del trayecto recorrido se mide en metros mediante la suma de la longitud entre todos los datos de inicio y final del viaje.

Inclinación entre puntos:

Para la inclinación entre los datos, se utiliza la librería de Python: Numpy. Para esto, se toma la diferencia de elevación entre el segundo punto menos el primero y se divide en la distancia existente entre ellos. Luego, basta con sacar el arco tangente de ese valor para obtener el ángulo de la pendiente, es decir:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_2 - h_1}{\Delta x}\right) \quad (3.1)$$

Es evidente que este puede ser positivo o negativo dependiendo si se está en subida o bajada, respectivamente.

Espacio temporal entre puntos:

Para la diferencia temporal entre cada punto se utilizan funciones de la librería de Python: Pandas. Para esto, se traspara la información del tiempo al elemento “DateTime” del mismo módulo, una vez realizado lo anterior, se puede obtener la variación en segundos. Luego, la duración total del trayecto recorrido se calcula mediante la suma de los lapsos entre todos los datos de inicio y final del viaje.

3.2.2. Agrupación de datos

Para la agrupación de datos, se realizaron dos grandes tareas: la separación de viajes y la identificación de trayectos. La diferencia recae en que los viajes contemplan un punto de inicio y final aleatorios y un recorrido mucho mayor, en cambio los trayectos tienen una ubicación

y una ruta definida.

Separación de viajes:

Para la separación de viajes se utilizó como criterio que, para pertenecer a uno solo, la diferencia temporal debe ser menor a 5 minutos, al momento de igualar o superar este valor se considera que inicia una nueva ruta. Luego, cada uno de estos es almacenado e identificado mediante un archivo “.csv” distinto.

Identificación de trayectos:

En cuanto a la identificación de trayectos, se utilizó “Google Earth” con el objetivo de evaluar cada viaje y separarlos para evitar el cúmulo de puntos, tal como se puede apreciar en la Figura A.1 del Anexo, además de encontrar rutas que se repitan. Al realizar esto, se obtienen recorridos con una distancia total menor a los viajes y con ubicaciones definidas para el punto de inicio y final.

También, dentro de esta tarea se definen trayectos cortos, medianos y largos:

- Trayecto corto: corresponden a aquellos recorridos con una distancia menor a 5 km.
- Trayecto mediano: son aquellos con una distancia recorrida entre 5 y 10 km.
- Trayecto largo: corresponden a aquellos recorridos con una distancia mayor a 10 km.

Las rutas para cada tipo de trayecto se definen en base a la cantidad de veces que se repite un mismo trayecto, donde se toman aquellos con mayor número de repeticiones. A continuación, se presentan los caminos que se utilizarán en el presente estudio:

Tabla 3.1: Rutas definidas para el presente estudio.

Ruta	Puntos	Dirección	Extensión [km]
Corto	Inicio	Metro Escuela Militar	1.2 - 2.0
	Final	Hotel Doubletree by Hilton Santiago Kennedy	
Mediano	Inicio	Copec, Autop. Costanera Nte., Km 33.75	5.0 - 5.5
	Final	Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez	
Largo	Inicio	Los Presidentes 1498, Maipú	12 - 13
	Final	Copec, Autop. Costanera Nte., Km 33.75	

Para cada ruta se tiene cierta cantidad de archivos .csv, en el caso del trayecto corto se cuenta con 5 elementos, en el caso del trayecto mediano se tienen 16 y hay 6 para el trayecto largo. Cada uno de estos recorridos se pueden apreciar en las figuras B.1, B.2, B.3 y B.4 del Anexo, para cada tipo de trayecto respectivamente.

Es posible observar que para el trayecto corto existen dos posibles caminos que llevan desde el Metro Escuela Militar hasta el Hotel Hilton, esto ocurre porque, a diferencia de los otros tipos de trayectos, se utilizaron estas dos posibles rutas para llegar de un lado a otro.

Es importante indicar el tipo de ruta que tiene cada trayecto:

- El trayecto corto corresponde a una ruta 100 % urbana.
- El trayecto mediano corresponde a una ruta que en su mayoría es carretera, solo al llegar al aeropuerto es similar a una ruta urbana.
- El trayecto largo corresponde a una ruta mayoritariamente de carretera.

3.2.3. Cálculo de potencia y energía

Energía en la rueda y energía eléctrica:

Una vez definidos e identificados todos los trayectos a utilizar, se procede a calcular la potencia en la rueda y la eléctrica para luego obtener las energías respectivas. Lo anterior se logra al utilizar las ecuaciones 2.12 y 2.15, para integrarlas mediante la ecuación 2.14.

Para lograr el paso anterior, se utilizaron los siguientes valores para las constantes:

Tabla 3.2: Valores utilizados para la ecuación 2.12 que permite obtener la energía en la rueda [16] y [12]

Parámetro	Valor
m	1521 [kg]
f_{rl}	0.013
g	9.8 [m/s ²]
ρ_a	1.2256 [kg/m ³]
C_D	0.28
A_f	2.3316 [m ²]

Como último paso, se utiliza el método de los polinomios de interpolación de Lagrange para resguardar de mejor manera el comportamiento real de la curva de energía en función de la posición, esto se logra utilizando la ecuación 2.21, dos puntos aguas arriba y uno aguas abajo del valor calculado para la energía en la rueda y eléctrica.

Corrección de datos para energía eléctrica:

Los datos existentes presentan errores en la medición de voltaje y/o corriente, lo que dificulta el cálculo de la energía eléctrica, tal como se puede apreciar en la ecuación 2.15. Con el objetivo de utilizar todos los trayectos, independiente de la problemática que pueden presentar, se procede a agrupar todos los recorridos donde si es factible realizar el cálculo de la potencia eléctrica, donde se logra juntar un total de 21 recorridos. Luego, se calcula tanto la energía en la rueda como la eléctrica y se utiliza la ecuación 2.16 para obtener la eficiencia eléctrica del motor en cada punto de los viajes.

Una vez que se tiene la eficiencia para cada punto de los trayectos, se procede a sacar un promedio entre todos para obtener una eficiencia eléctrica promedio del vehículo utilizado y, de esta manera, obtener la energía eléctrica en aquellos recorridos en donde se tenían errores en la medición de voltaje y/o corriente.

Energía del sistema de climatización:

Para conocer el consumo debido al sistema de climatización se utiliza la ecuación 2.3 para calcular la energía consumida debido al sistema de climatización, para esto, se definen “temperaturas estacionales” para cada mes, esto se hace utilizando la base de datos proporcionada por el explorador solar, donde se tienen datos de los años comprendidos entre 2004 y 2016, lo que entrega la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Temperaturas estacionales definidas en base a los datos del explorador solar [23].

Mes	T [°C]
Enero	29.484
Febrero	28.937
Marzo	27.587
Abril	23.335
Mayo	19.135
Junio	16.355
Julio	15.731
Agosto	17.084
Septiembre	19.560
Octubre	22.544
Noviembre	26.085
Diciembre	28.094

Luego, solo basta con identificar el mes en que se realizó el recorrido y utilizar la temperatura correspondiente en la ecuación 2.3 para obtener la energía consumida debido al sistema de climatización.

3.2.4. Rendimiento del vehículo:

Luego de tener todas las energías calculadas, se procede a la obtención del rendimiento del vehículo que, tal como se mencionó anteriormente, se encuentra en unidades de energía utilizada dividida en distancia recorrida. Para el presente trabajo se usan kilowatts por hora [kWh] como unidad de medida de energía y kilómetros para la distancia.

Entonces, lo que se realiza para obtener el rendimiento es graficar la energía consumida en la rueda en función de la distancia recorrida y, con esto, obtener el valor de la pendiente a lo largo de toda la curva. Para obtener este rendimiento se utiliza el punto actual y el anterior para obtener la tasa de cambio, en [kWh/km], para cada punto del trayecto.

Luego, se procede a sacar el promedio a lo largo de todo el recorrido para obtener el rendimiento del viaje, estos se agrupan según el trayecto, es decir, todas las pendientes de la ruta A se separan de las de la ruta B, y así con las demás hasta designarlas todas. Para el presente trabajo, se tiene como referencia el valor de 149 [Wh/km] o 0.149 [kWh/km] para

el vehículo Hyundai Ioniq 6 [13].

Finalmente, se obtiene el rendimiento promedio para cada grupo de datos, con esto se obtiene tanto la energía consumida como los kilowatt-hora por kilómetro utilizados para cada ruta predefinida en este trabajo.

3.2.5. Diferencia horaria

Ya se tiene una diferencia energética ligada al mes en que se realiza el recorrido, sin embargo, no se tiene noción del efecto de la hora en la que éste se realiza. Para esto, es que se utiliza un cuarto trayecto comprendido entre el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez y el ingreso al túnel de la Autopista Costanera Norte ubicado en Gral. Prieto 1430, Independencia, tal como se observa en la Figura B.5 del Anexo.

Este trayecto cuenta con 22 recorridos, para los cuales se obtuvo la energía en la rueda consumida y se determinó la hora en la que se realizó el viaje. Dentro de los horarios presentes en los datos, se definió la siguiente distribución expuesta en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Distribución horaria establecida para los distintos recorridos.

Rangos horarios	Nombre del rango
06:00-12:00	Mañana
12:00-18:00	Tarde
18:00-00:00	Noche

Una vez definida la distribución a seguir, se procedió a distribuir los 22 recorridos en los grupos Mañana, Tarde y Noche según el horario en que se realizaron. Posteriormente, se obtuvo el promedio para cada uno y se obtuvo la diferencia porcentual con respecto al bloque de la tarde. Con esto, se puede observar la variación de la energía consumida con respecto al horario en que se realiza cada viaje.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Características generales de cada tipo de trayecto

A continuación, se presenta una Tabla resumen 4.1 para cada tipo de trayecto seleccionado. Esta se construyó utilizando el valor promedio para cada una de las características señaladas.

Tabla 4.1: Tabla resumen para cada tipo de trayecto.

Trayecto	Corto	Mediano	Largo
Energía en la rueda [kWh]	0.123	0.521	1.123
Energía eléctrica [kWh]	0.135	0.570	1.230
Energía AC [kWh]	0.205	0.237	0.405
Distancia recorrida [km]	1.66	5.22	12.73
Tiempo de viaje [min]	6.7	8.5	16.3
Velocidad [km/h]	14.96	36.73	46.61
# Recorridos	5	16	6
Rendimiento [kWh/km]	0.093	0.089	0.132

4.2. Eficiencia del motor eléctrico

Luego de obtener las eficiencias para cada punto de los 21 recorridos cuya lectura de datos se encontraba en perfecto estado, se obtuvo el promedio de todos estos, dando como resultado una eficiencia eléctrica de un 91.3%.

4.3. Energía consumida para cada tipo de trayecto

Uno de los grupos de gráficos de mayor interés para el presente informe corresponden al comportamiento de la curva de energía en función del tiempo y de la posición, para esto, se procede a representar su conducta para cada trayecto.

Al tener más de un recorrido por trayecto, se seleccionan dos para cada tipo. El criterio de selección se basa en el menor y mayor tráfico. Esto se determina eligiendo los recorridos con la menor y mayor cantidad de puntos o tiempo, pues, al recorrer la misma ruta y distancia, la

diferencia radica en la duración del tránsito, lo que se asume que es causado por la congestión vehicular.

4.3.1. Trayecto corto



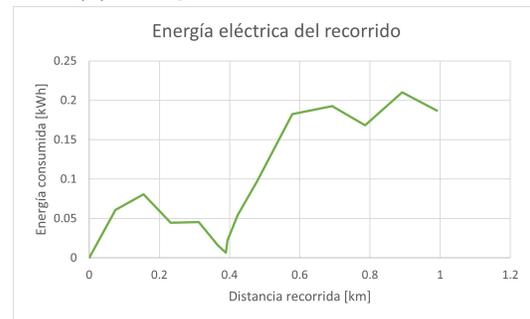
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura 4.1: Energías para el trayecto corto con menor tráfico.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



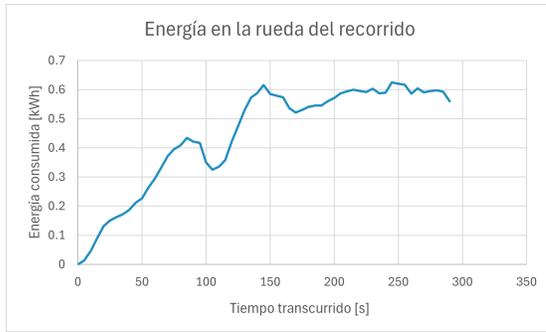
(c) Energía eléctrica vs tiempo.



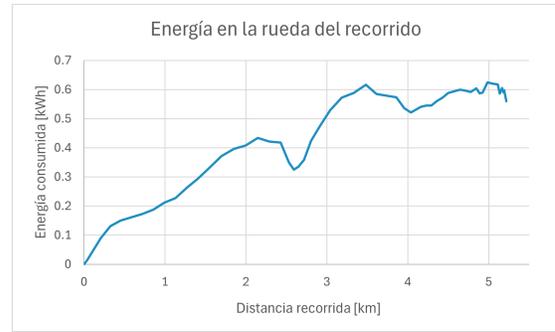
(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura 4.2: Energías para el trayecto corto con mayor tráfico.

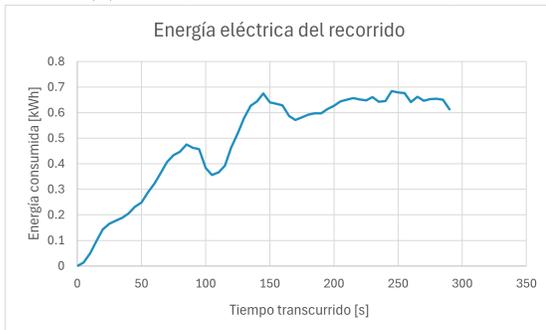
4.3.2. Trayecto mediano



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

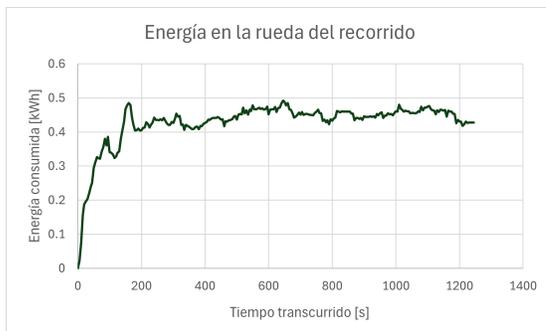


(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

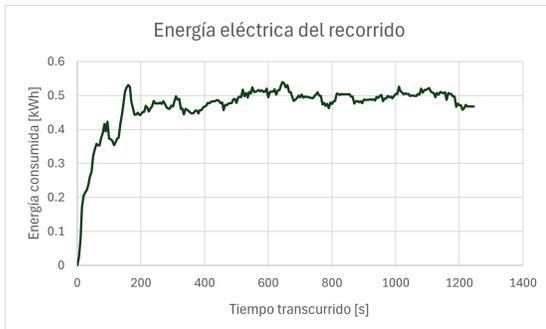
Figura 4.3: Energías para el trayecto mediano con menor tráfico.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura 4.4: Energías para el trayecto mediano con mayor tráfico.

4.3.3. Trayecto largo

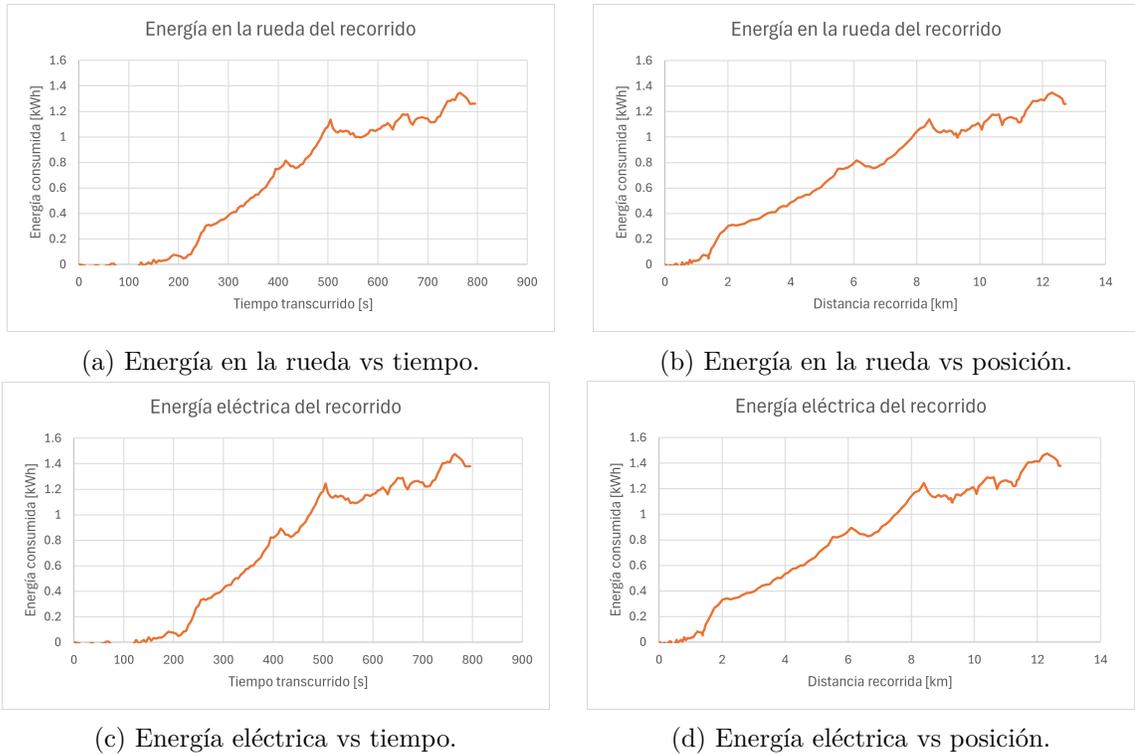


Figura 4.5: Energías para el trayecto largo con menor tráfico.

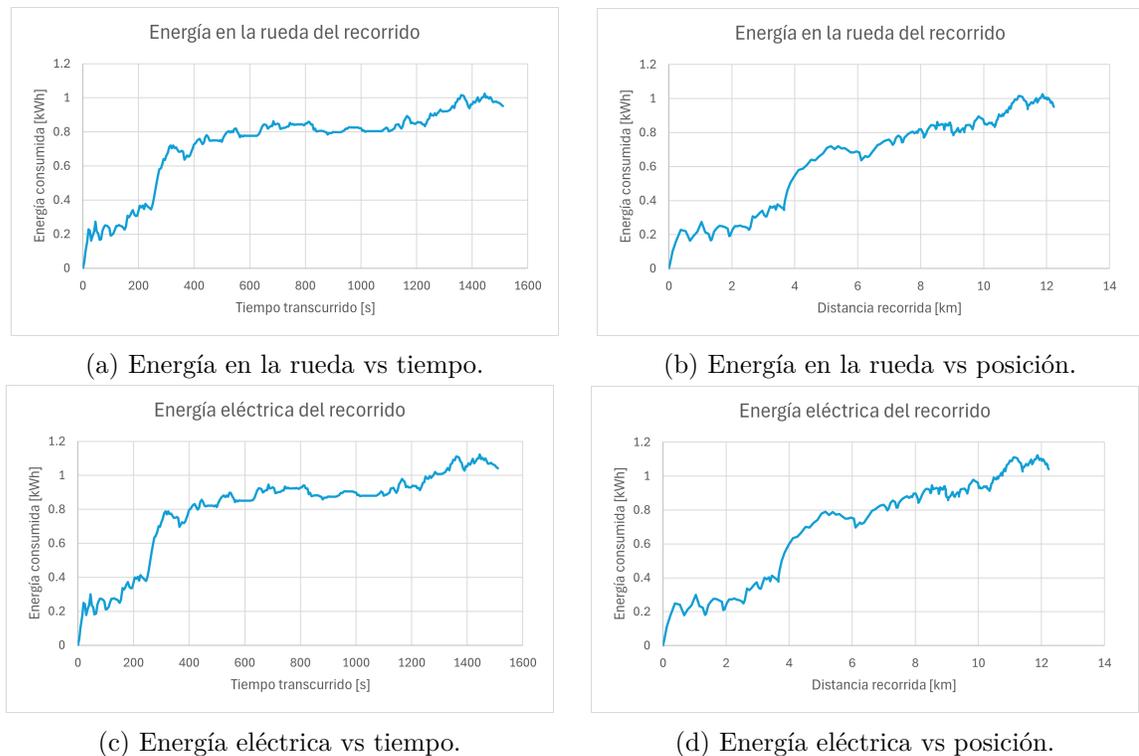
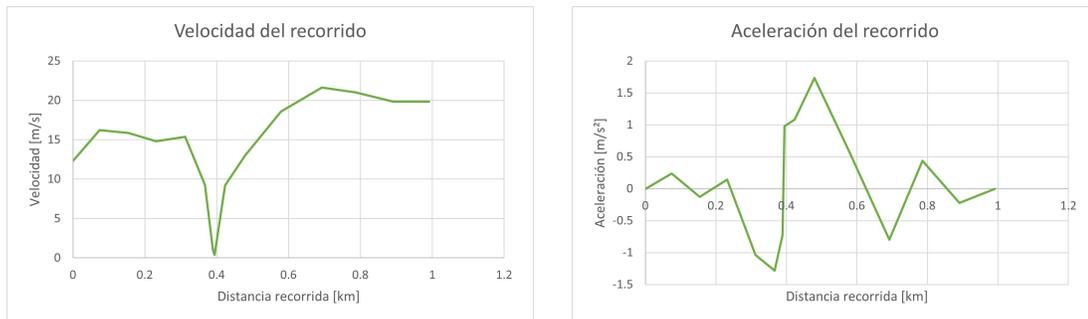


Figura 4.6: Energías para el trayecto largo con mayor tráfico.

4.4. Velocidad, aceleración y elevación para cada tipo de trayecto

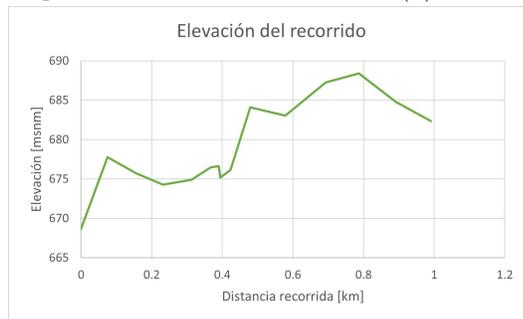
A continuación, se presentan las velocidades, aceleraciones y la elevación a lo largo del camino para los mismos dos recorridos en cada tipo de trayecto utilizados en la sección anterior, es decir, uno con poco tráfico y otro con mucho.

4.4.1. Velocidades, aceleraciones y elevaciones del trayecto corto



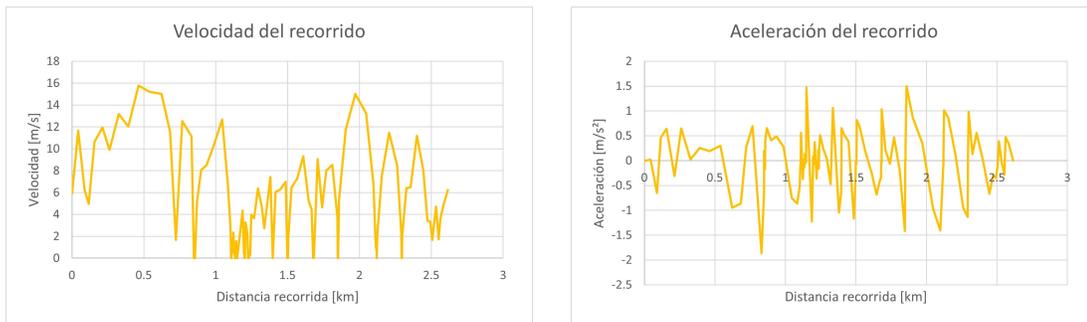
(a) Velocidad vs posición.

(b) Aceleración vs posición.



(c) Elevación vs posición.

Figura 4.7: Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto corto con menor tráfico.



(a) Velocidad vs posición.

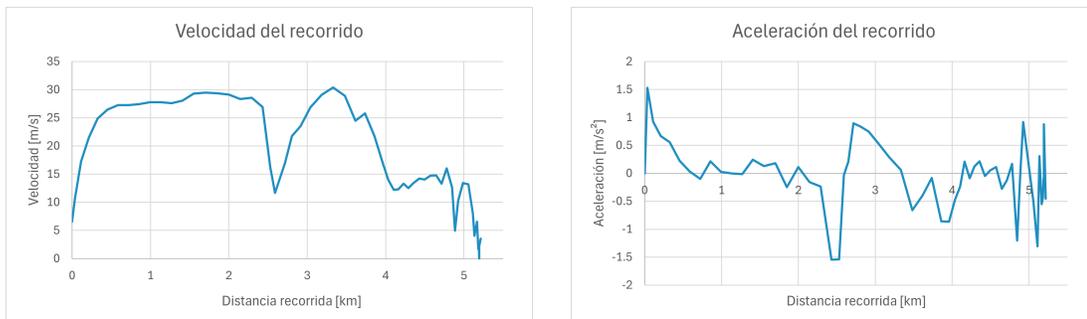
(b) Aceleración vs posición.



(c) Elevación vs posición.

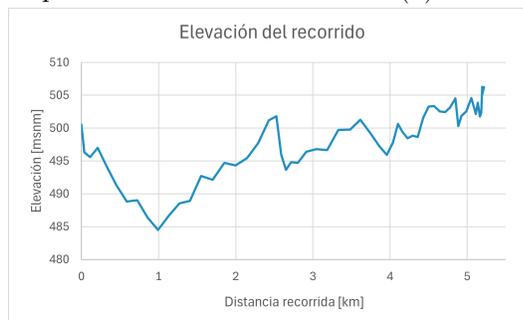
Figura 4.8: Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto corto con mayor tráfico.

4.4.2. Velocidades, aceleraciones y elevaciones del trayecto Mediano



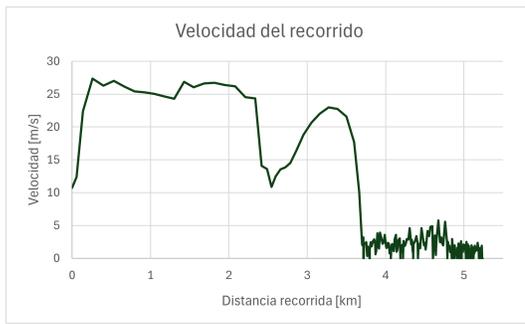
(a) Velocidad vs posición.

(b) Aceleración vs posición.

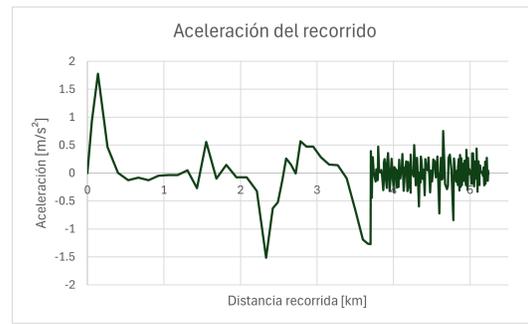


(c) Elevación vs posición.

Figura 4.9: Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto mediano con menor tráfico.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.



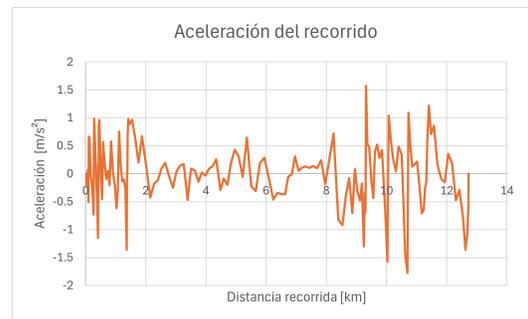
(c) Elevación vs posición.

Figura 4.10: Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto mediano con mayor tráfico.

4.4.3. Velocidades, aceleraciones y elevaciones del trayecto Largo



(a) Velocidad vs posición.

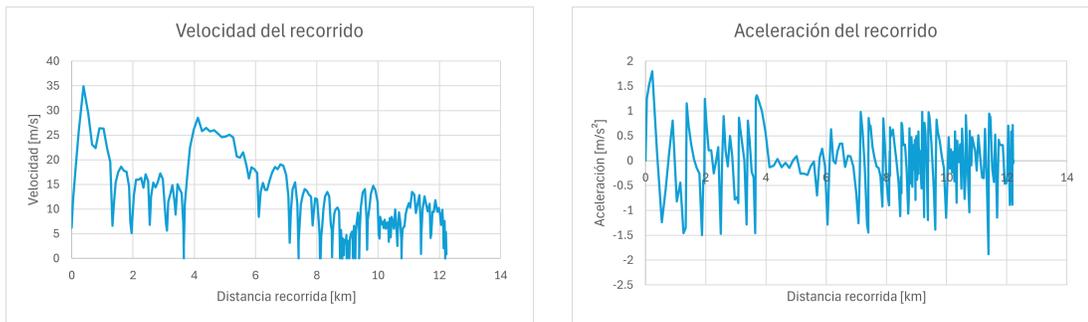


(b) Aceleración vs posición.



(c) Elevación vs posición.

Figura 4.11: Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto largo con menor tráfico.



(a) Velocidad vs posición.

(b) Aceleración vs posición.



(c) Elevación vs posición.

Figura 4.12: Velocidad, aceleración y elevación para el trayecto largo con mayor tráfico.

4.5. Rendimientos de los vehículos a lo largo de cada recorrido

A continuación, se muestran los rendimientos de cada recorrido para los trayectos corto, mediano y largo en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4, respectivamente.

Trayecto corto:

Tabla 4.2: Rendimiento de cada recorrido para el trayecto corto, con su respectivo promedio.

Recorrido	Rendimiento [kWh/km]
1	-0.019
2	0.077
3	0.121
4	0.132
5	0.155
Promedio	0.093

Trayecto mediano:

Tabla 4.3: Rendimiento de cada recorrido para el trayecto mediano, con su respectivo promedio.

Recorrido	Rendimiento [kWh/km]
1	0.080
2	0.062
3	0.099
4	0.082
5	0.054
6	0.147
7	0.084
8	0.074
9	0.052
10	0.071
11	0.085
12	0.125
13	0.119
14	0.098
15	0.104
16	0.081
Promedio	0.089

Trayecto largo:

Tabla 4.4: Rendimiento de cada recorrido para el trayecto largo, con su respectivo promedio.

Recorrido	Rendimiento [kWh/km]
1	0.122
2	0.127
3	0.249
4	0.085
5	0.121
6	0.085
Promedio	0.132

4.6. Rendimientos según tipo de ruta

Con el objetivo de observar el rendimiento según la posición y el tipo de ruta, se procede a dividir el trayecto largo en cuatro tramos, tal como se aprecia en la Figura C.1 del Anexo, donde se obtuvo lo siguiente:

Tabla 4.5: Rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo.

Recorrido	Tipo de ruta	Rendimiento [kWh/km]
Tramo 1	Urbano	0.072
Tramo 2	Carretera	0.105
Tramo 3	Urbano	0.066
Tramo 4	Carretera	0.131

4.7. Energía consumida en la rueda para cada recorrido

Para determinar la cantidad de energía que se consume desde el punto de inicio hasta el punto de término de un trayecto definido, es necesario observar cuánta se utiliza en cada uno de los recorridos.

4.7.1. Recorridos trayecto corto

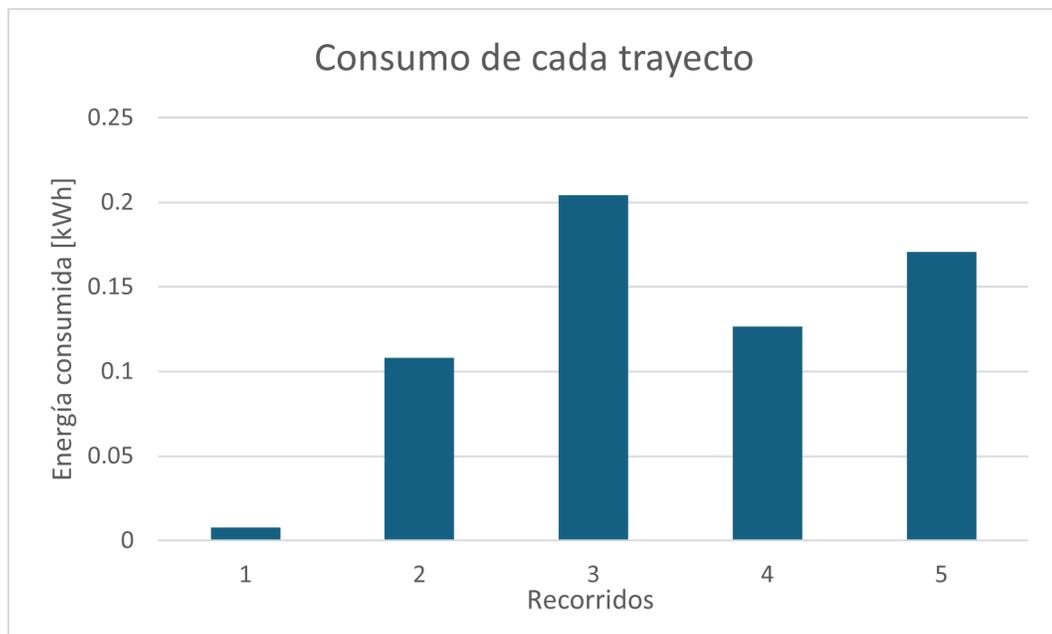


Figura 4.13: Energía consumida en la rueda para cada recorrido del trayecto corto.

4.7.2. Recorrido trayecto mediano

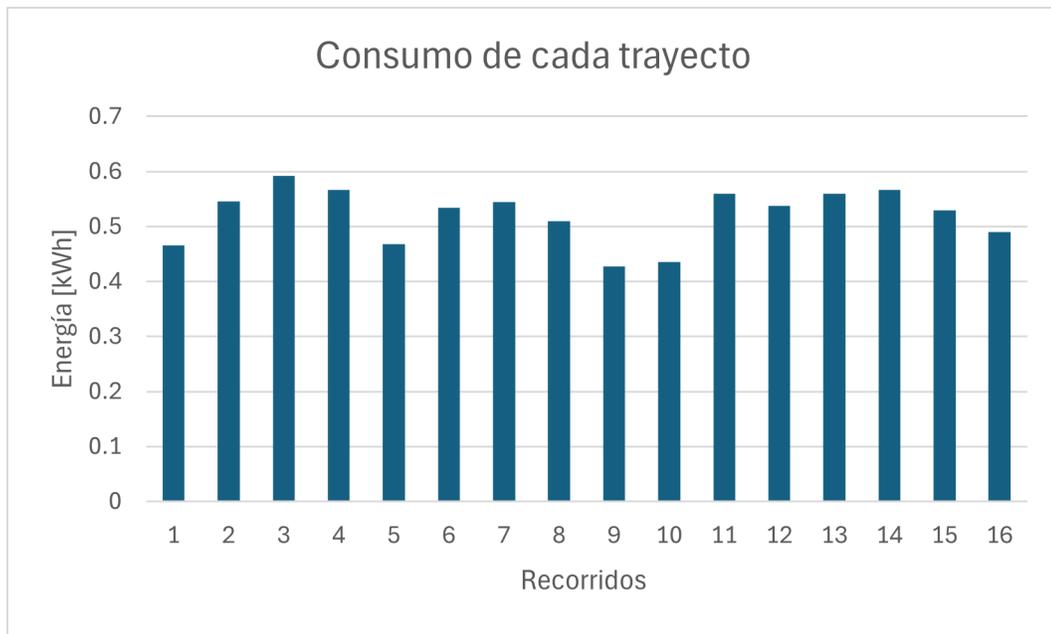


Figura 4.14: Energía consumida en la rueda para cada recorrido del trayecto mediano.

4.7.3. Recorridos trayecto largo

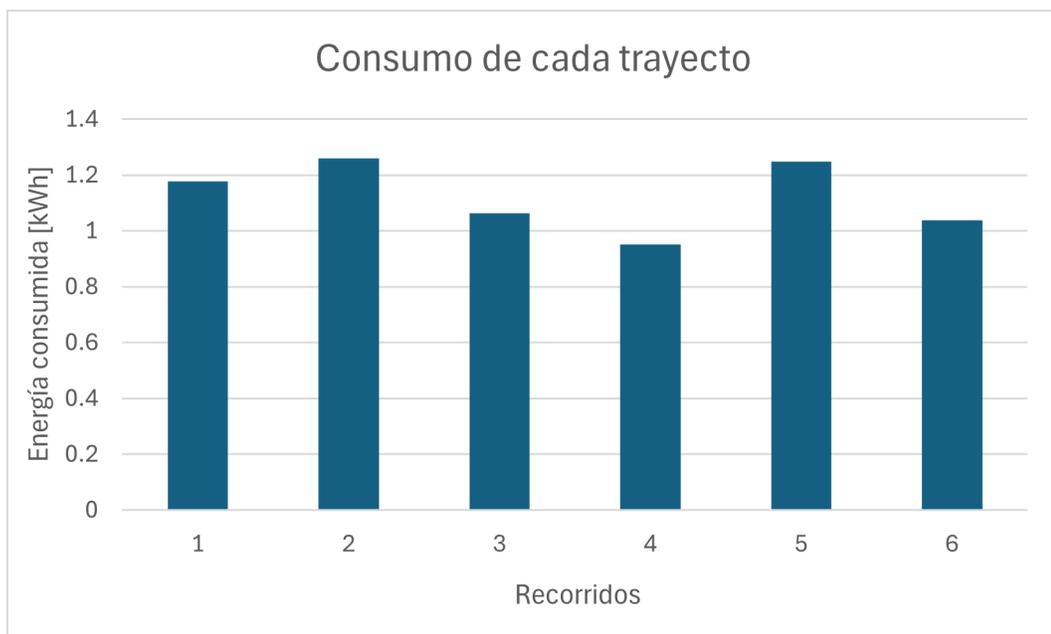


Figura 4.15: Energía consumida en la rueda para cada recorrido del trayecto largo.

4.8. Comportamiento de los recorridos en función de la posición

Para comprender si los recorridos de cada tipo de trayecto son consistentes con la ruta, se presentan las energías consumidas de cada uno en función de la posición, con un color distinto para cada uno.

4.8.1. Energías consumidas trayecto corto

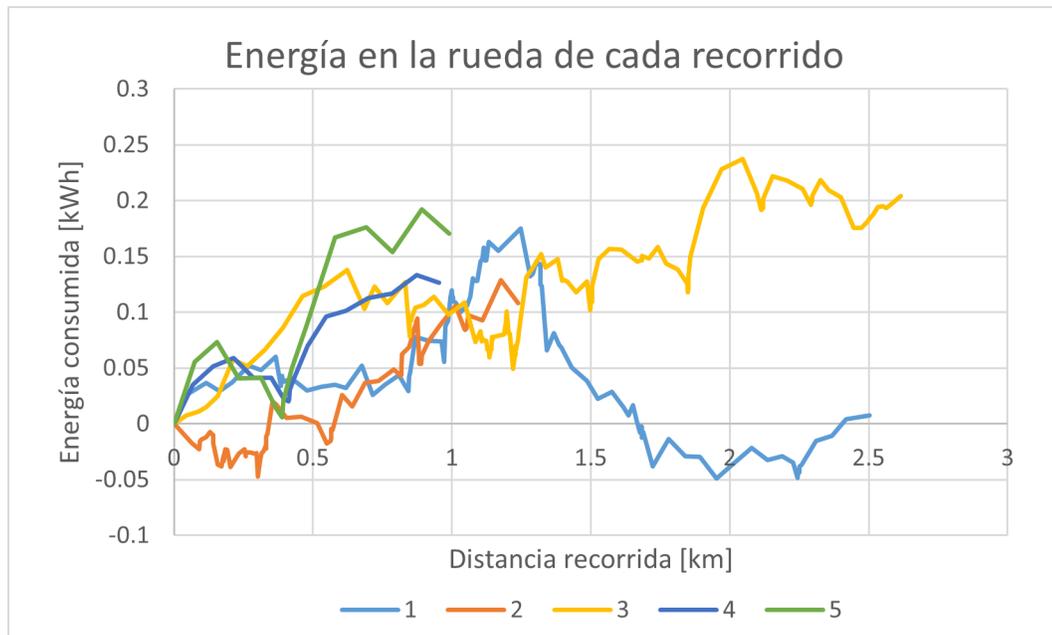


Figura 4.16: Comportamiento de la energía en la rueda para cada recorrido en el trayecto corto.

4.8.2. Energías consumidas trayecto mediano

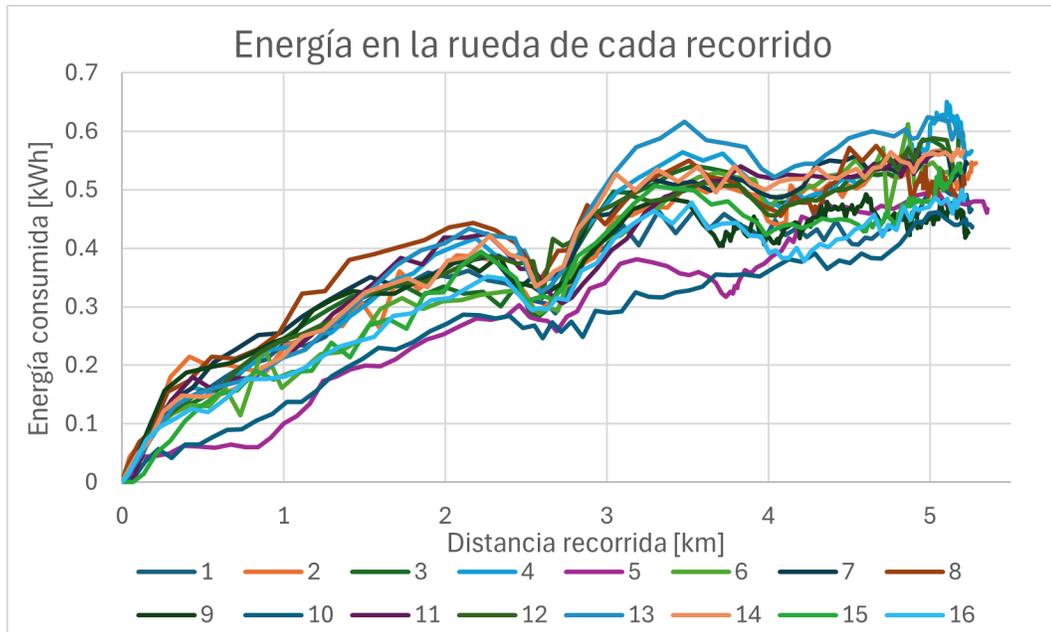


Figura 4.17: Comportamiento de la energía en la rueda para cada recorrido en el trayecto mediano.

4.8.3. Energías consumidas trayecto largo

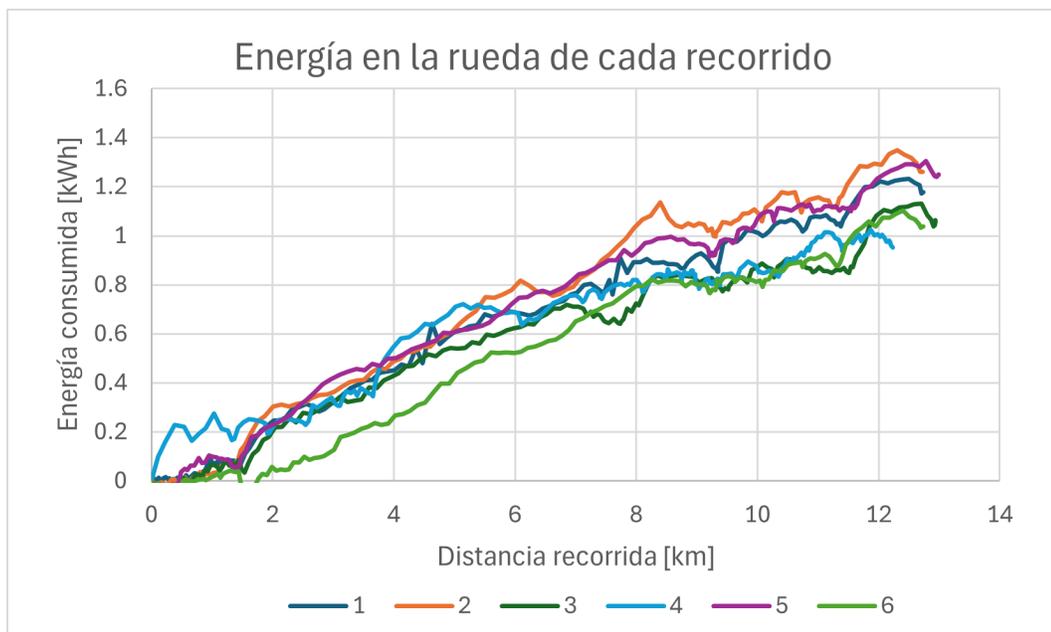


Figura 4.18: Comportamiento de la energía en la rueda para cada recorrido en el trayecto largo.

4.9. Características promedio por tramos

Con el fin de entender de mejor manera la curva de consumo por kilómetro, se procede a observar que ocurre en cada tramo.

4.9.1. Características promedios para el trayecto mediano

Tabla 4.6: Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto mediano.

Tramos [km]	E [kWh]	E_{acum} [kWh]	V [km/h]	V_{acum} [km/h]	Rendimiento [kWh/km]
0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000
1	0.199	0.199	72.60	67.54	0.199
2	0.147	0.346	90.30	77.11	0.147
3	0.066	0.411	63.81	72.03	0.066
4	0.042	0.453	69.26	68.80	0.042
5	0.076	0.530	33.28	53.11	0.076

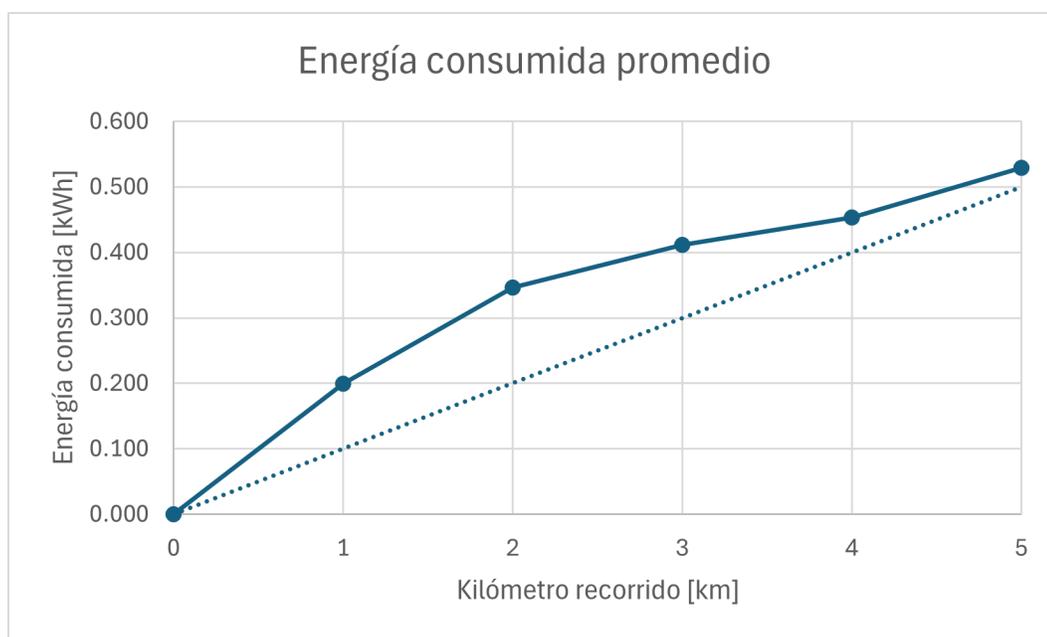


Figura 4.19: Consumo acumulado en función del kilómetro recorrido de cada tramo del trayecto mediano.

4.9.2. Características promedios para el trayecto largo

Tabla 4.7: Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo.

Tramos [km]	E [kWh]	E_{acum} [kWh]	V [km/h]	V_{acum} [km/h]	Rendimiento [kWh/km]
0	0	0	0	0	0
1	0.088	0.088	32.35	30.89	0.088
2	0.105	0.193	41.40	33.42	0.105
3	0.116	0.309	75.05	39.11	0.116
4	0.130	0.438	79.23	43.17	0.130
5	0.130	0.568	90.40	48.06	0.130
6	0.102	0.671	89.26	52.05	0.102
7	0.071	0.741	79.49	54.38	0.071
8	0.121	0.863	68.88	54.78	0.121
9	0.031	0.894	63.68	53.47	0.031
10	0.061	0.955	58.28	49.71	0.061
11	0.058	1.013	44.11	48.98	0.058
12	0.129	1.142	47.56	48.81	0.129

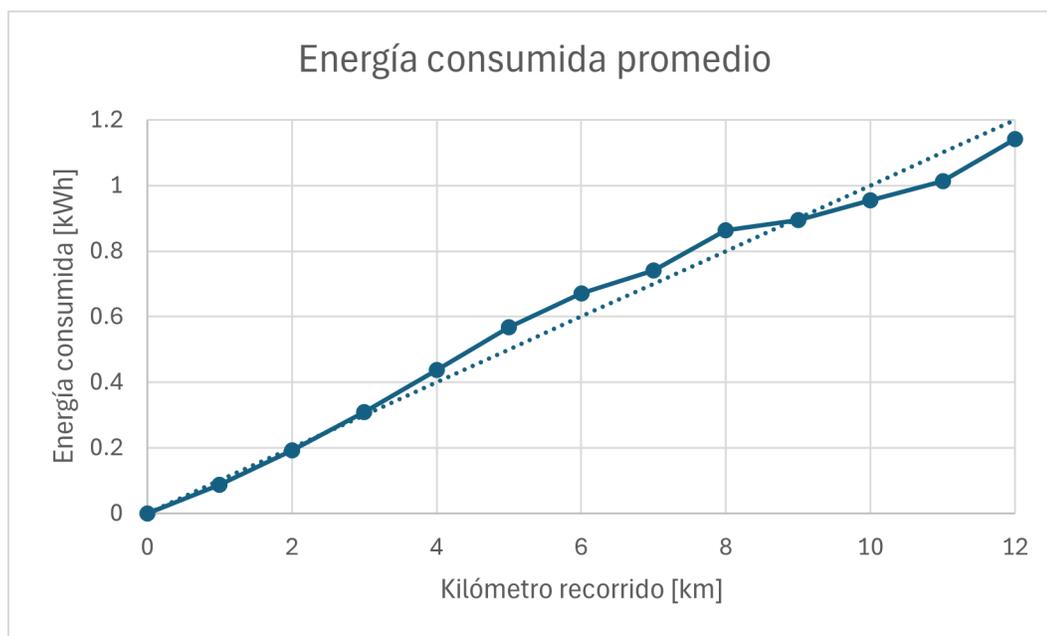


Figura 4.20: Consumo acumulado en función del kilómetro recorrido de cada tramo del trayecto largo.

4.9.3. Características promedios para los recorridos de mayor y menor consumo del trayecto largo

Tabla 4.8: Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo con mayor consumo.

Tramos	E [kWh]	E acum [kWh]	V [km/h]	V acum [km/h]	Rendimiento [kWh/km]
0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000
1	0.026	0.026	21.44	21.50	0.026
2	0.239	0.264	39.52	27.51	0.239
3	0.089	0.353	91.40	36.17	0.089
4	0.133	0.486	86.53	42.84	0.133
5	0.119	0.606	86.91	47.48	0.119
6	0.174	0.779	103.09	52.17	0.174
7	0.013	0.792	90.60	55.54	0.013
8	0.239	1.031	91.18	58.42	0.239
9	0.009	1.041	85.25	60.43	0.009
10	0.068	1.109	70.36	57.47	0.068
11	0.044	1.153	55.16	57.25	0.044
12	0.141	1.294	56.00	57.14	0.141

Tabla 4.9: Consumo, velocidad y rendimiento promedio para cada tramo del trayecto largo con menor consumo.

Tramos	E [kWh]	E acum [kWh]	V [km/h]	V acum [km/h]	Rendimiento [kWh/km]
0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000
1	0.217	0.217	85.88	78.84	0.217
2	-0.011	0.206	53.29	63.29	-0.011
3	0.134	0.340	52.96	59.38	0.134
4	0.203	0.543	42.20	53.76	0.203
5	0.134	0.678	93.90	58.29	0.134
6	0.012	0.690	75.14	60.63	0.012
7	0.069	0.759	57.40	60.13	0.069
8	0.060	0.819	26.50	52.49	0.060
9	-0.014	0.805	11.41	37.38	-0.014
10	0.073	0.878	28.68	30.60	0.073
11	0.100	0.978	20.12	29.28	0.100
12	0.029	1.007	33.89	29.63	0.029

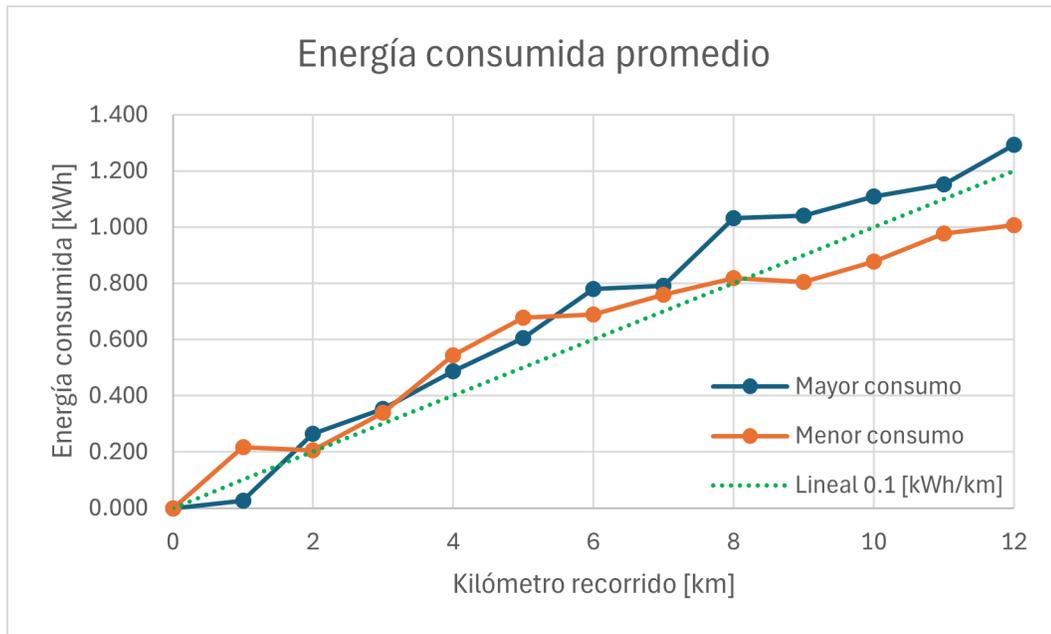


Figura 4.21: Comparación del consumo acumulado en función del kilómetro para el recorrido con mayor y menor energía.

4.10. Energía consumida por sistema de climatización

También, se presentan los gráficos de las energías consumidas debido al sistema de climatización. Estas señalan el mes en que se realizó el recorrido para evidenciar las diferencias existentes por el cambio en la temperatura ambiente que, para este trabajo, se representan mediante las “Temperaturas estacionales”. Además, se añaden las tablas 4.10, 4.11 y 4.12, en las que se muestran el mes, el número del recorrido, la longitud del trayecto, el tiempo total y la cantidad de puntos para los distintos tipos de trayectos:

4.10.1. Energías por sistema de climatización trayecto corto

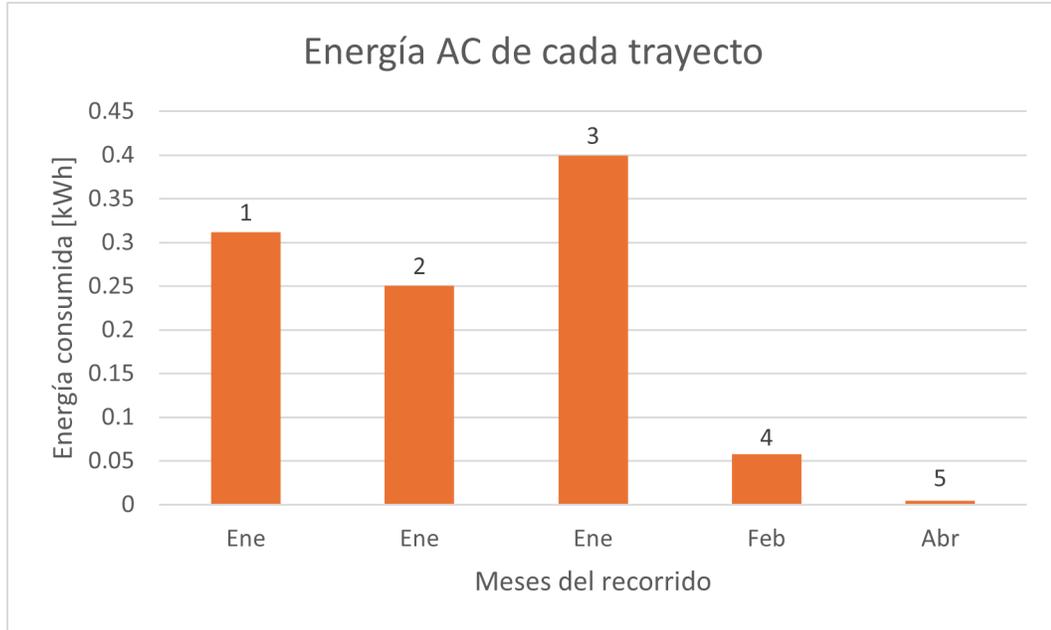


Figura 4.22: Consumo por mes del sistema de climatización para cada recorrido en el trayecto corto.

Tabla 4.10: Información de la distancia, duración y mes para cada recorrido del trayecto corto.

Mes	Nº recorrido	Distancia recorrida [km]	Tiempo total [s]	Puntos
Ene	1	2.504	585	118
Ene	2	1.237	470	95
Ene	3	1.245	750	151
Feb	4	2.616	120	25
Abr	5	0.954	70	15

4.10.2. Energías por sistema de climatización trayecto mediano

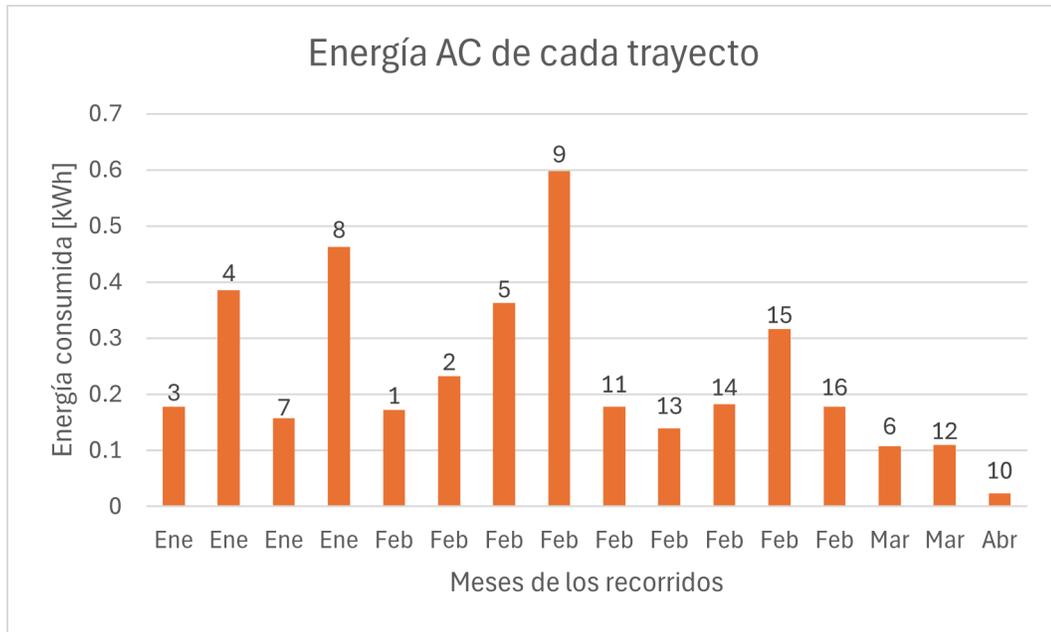


Figura 4.23: Consumo por mes del sistema de climatización para cada recorrido en el trayecto mediano.

Tabla 4.11: Información de la distancia, duración y mes para cada recorrido del trayecto mediano.

Mes	Nº Recorrido	Distancia recorrida [km]	Tiempo total [s]	Puntos
Ene	3	5.207	335	68
Ene	4	5.257	725	146
Ene	7	5.229	295	60
Ene	8	5.214	870	175
Feb	1	5.257	360	73
Feb	2	5.287	485	98
Feb	5	5.355	755	152
Feb	9	5.238	1245	250
Feb	11	5.013	370	75
Feb	13	5.216	290	59
Feb	14	5.205	380	77
Feb	15	5.195	660	133
Feb	16	5.218	370	75
Mar	6	5.211	310	63
Mar	12	5.188	315	64
Abr	10	5.263	375	76

4.10.3. Energías por sistema de climatización trayecto largo

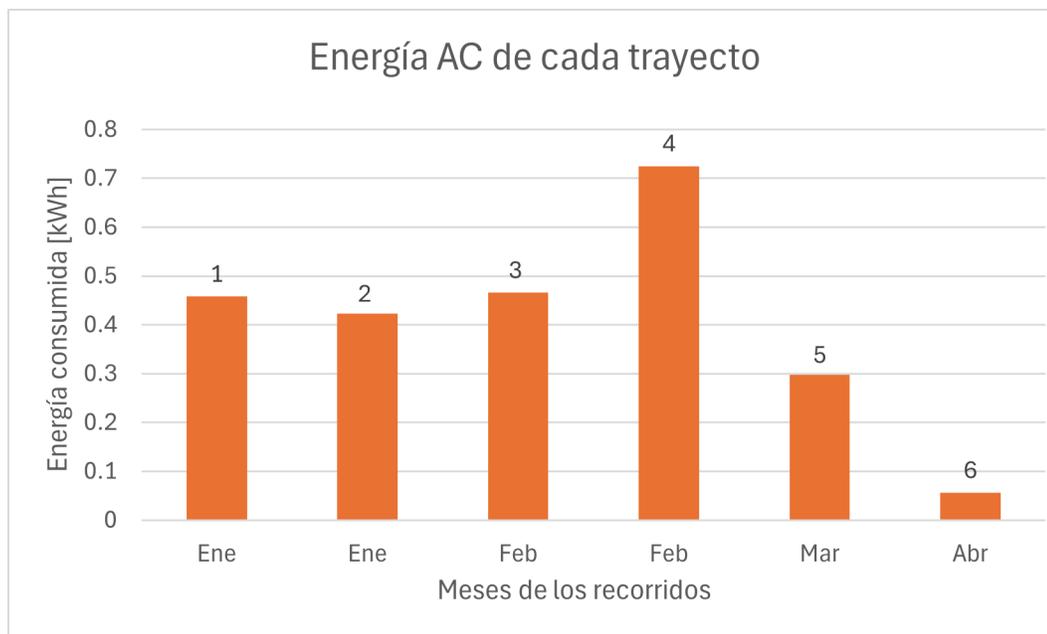


Figura 4.24: Consumo por mes del sistema de climatización para cada recorrido en el trayecto largo.

Tabla 4.12: Información de la distancia, duración y mes para cada recorrido del trayecto largo.

Mes	Nº Recorrido	Distancia recorrida [km]	Tiempo total [s]	Puntos
Ene	1	12.737	860	173
Ene	2	12.730	795	160
Feb	3	12.934	970	195
Feb	4	12.230	1510	303
Mar	5	12.993	855	172
Abr	6	12.739	880	177

4.11. Consumo del sistema de climatización por mes

Como bien se mencionó e indicó en la Tabla 3.3, se utilizan temperaturas estacionales para el modelo lineal de la ecuación 2.3. Dicho esto, el consumo debido al sistema de climatización para cada mes se observa en la Tabla 4.13 y se plasma en la Figura 4.25:

Tabla 4.13: Potencia debido al sistema de climatización y la energía que consume por segundo en cada mes del año.

Mes	Potencia AC [kW]	Energía AC [kWh/s]
Ene	1.92	0.00053
Feb	1.73	0.00048
Mar	1.26	0.00035
Abr	-0.23	-0.00006
May	-1.70	-0.00047
Jun	-2.68	-0.00074
Jul	-2.89	-0.00080
Ago	-2.42	-0.00067
Sep	-1.55	-0.00043
Oct	-0.51	-0.00014
Nov	0.73	0.00020
Dic	1.43	0.00040

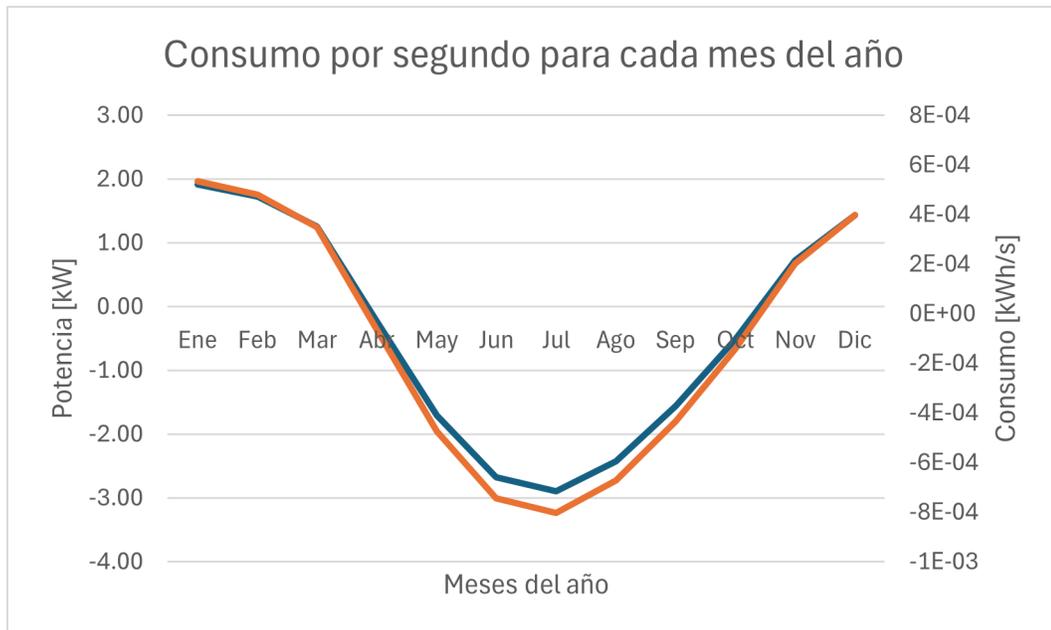


Figura 4.25: Variación de la potencia y energía consumida debido al aire acondicionado.

4.12. Variación porcentual de la energía según horario

Tal como se indicó previamente, se utilizó un cuarto trayecto con 22 recorridos en distintos horarios, donde se estableció la diferencia porcentual que presenta la energía consumida a lo largo del recorrido con respecto al bloque de la tarde, de esta manera se determina la dependencia con el rango horario en el cual se lleva a cabo la ruta.

Tabla 4.14: Energía consumida, especificando el horario, para cada recorrido del trayecto extra de la Figura B.5 del Anexo.

n°	Mes	Hora	Rango	Energía consumida [kWh]
1	Abril	23	Noche	2.503
2	Febrero	4	Mañana	2.194
3	Febrero	15	Tarde	2.494
4	Febrero	10	Mañana	2.468
5	Febrero	14	Tarde	2.356
6	Enero	21	Noche	2.341
7	Enero	21	Noche	2.479
8	Febrero	15	Tarde	2.340
9	Enero	18	Noche	2.370
10	Enero	19	Noche	2.486
11	Enero	11	Mañana	2.524
12	Abril	21	Noche	2.351
13	Enero	22	Noche	2.592
14	Marzo	22	Noche	2.316
15	Marzo	21	Noche	2.687
16	Febrero	20	Noche	2.537
17	Enero	13	Tarde	2.780
18	Febrero	19	Noche	2.402
19	Febrero	19	Noche	2.053
20	Febrero	17	Tarde	2.330
21	Febrero	18	Noche	2.147
22	Febrero	22	Noche	2.638

Tabla 4.15: Energía consumida promedio y diferencia porcentual para cada rango horario.

Rango horario	Nombre del rango	Energía promedio [kWh/km]	Diferencia porcentual
06:00-12:00	Mañana	2.395	-2.63 %
12:00-18:00	Tarde	2.460	0 %
18:00-00:00	Noche	2.422	-1.56 %

4.13. Consumo por trayecto

A continuación, se presentan las tablas 4.16, 4.17 y 4.18, en las que se muestra la energía que se consume al realizar los trayectos cortos, medianos y largos, diferenciando por el horario en que se realizan:

Trayecto corto:

Tabla 4.16: Energía que se consume, según bloque horario, al realizar el trayecto corto, figuras B.1 y B.2 del Anexo.

Rango horario	Bloque horario	Energía en la rueda [kWh]	Energía eléctrica [kWh]
06:00 - 12:00	Mañana	0.120	0.132
12:00 - 18:00	Tarde	0.123	0.135
18:00 - 00:00	Noche	0.121	0.133

Trayecto mediano:

Tabla 4.17: Energía que se consume, según bloque horario, al realizar el trayecto mediano, Figura B.3 del Anexo.

Rango horario	Bloque horario	Energía en la rueda [kWh]	Energía eléctrica [kWh]
06:00-12:00	Mañana	0.507	0.555
12:00-18:00	Tarde	0.521	0.570
18:00-00:00	Noche	0.513	0.562

Trayecto largo:

Tabla 4.18: Energía que se consume, según bloque horario, al realizar el trayecto largo, Figura B.4 del Anexo.

Rango horario	Bloque horario	Energía en la rueda [kWh]	Energía eléctrica [kWh]
06:00-12:00	Mañana	1.094	1.198
12:00-18:00	Tarde	1.123	1.230
18:00-00:00	Noche	1.106	1.211

Capítulo 5

Análisis y discusión

Los resultados presentados en el capítulo 4 permiten generar una discusión sobre el efecto de las condiciones de la ruta, del ambiente, de la velocidad y la aceleración en la energía de cada viaje. También, es posible analizar el impacto respecto al horario en el que se realiza el recorrido y la influencia que tiene el tipo de ruta.

5.1. Análisis de las características del trayecto y del vehículo

A partir de la tabla resumen para cada tipo de trayecto 4.1 es posible observar que el trayecto mediano posee el 59 % de los recorridos totales utilizados para el estudio. Lo anterior, comparado con el 18.5 % y 22.2 % de los trayectos corto y largo, respectivamente, puede sugerir que los valores obtenidos para la ruta mediana son más confiables pues posee mayor cantidad de muestras.

También, es posible indicar que mientras mayor sea la distancia y duración del trayecto, mayor es la energía en la rueda (ecuación 2.12), la energía eléctrica (ecuación 2.15) y la energía del sistema de climatización (ecuación 2.3).

Además, se observa el aumento de la velocidad promedio en cada trayecto, lo que puede indicar una proporcionalidad directa con el consumo energético del viaje. Pues, de la Tabla 4.1, se observa que, mientras mayor es la velocidad promedio, mayor es la energía consumida. Lo anterior, guarda relación con el aumento en el consumo debido al sistema de climatización debido al fenómeno de la convección externa, donde la velocidad entre el fluido y el cuerpo afecta al intercambio térmico entre éstos y, por consecuencia, influye en el gasto del sistema de climatización.

Lo mencionado anteriormente, indicaría que mientras mayor sea la distancia, el tiempo y la velocidad promedio del recorrido más energía se consumirá, lo que tiene sentido pues es lógico que un viaje más largo tenga un gasto superior. Sin embargo, estas no son las únicas dependencias que tiene el consumo energético, también varía según el tipo de ruta que se utiliza.

Como se indicó en el capítulo 2, un EV tiene menor consumo en rutas urbanas que en carreteras [33] gracias a su sistema de regeneración al freno. Dicho esto, al observar los rendimientos (Tabla 4.1) que tienen los vehículos en cada recorrido, es posible notar que estos

varían según la ruta seleccionada. Donde, el trayecto largo (carretera) presenta el peor rendimiento con un valor de 0.132 [kWh/km] y el trayecto mediano (ruta híbrida) es la que posee el mejor número con un total de 0.089[kWh/km].

Por último, en relación a las características del vehículo, en la sección 4.2 se menciona que la eficiencia del motor eléctrico es de un 91.3% que, según indica Fiori et al. [16], se encuentra en el rango de eficiencia del Nissan Leaf, cuyos valores varían entre 85% y 95%. Con esto, es posible indicar que la eficiencia obtenida y utilizada para el cálculo de la energía eléctrica, mediante la ecuación 2.17, tiene un valor aceptable.

5.2. Análisis del consumo energético según el tipo de trayecto

5.2.1. Trayecto corto

Sin tráfico

Con respecto a los gráficos de la Figura 4.1, correspondiente al trayecto sin tráfico, en la ilustración de la energía en la rueda versus tiempo, existe un aumento rápido de la energía consumida a partir de los 30 segundos hasta los 50. Lo anterior, se evidencia, para el caso de la energía en la rueda versus posición, desde los 0.4 kilómetros hasta los 0.6, con un aumento constante sin ningún tipo de regeneración.

Al observar la Figura 4.7 se observa que, a partir de los 0.4 kilómetros, existe un aumento de la velocidad que reduce su pendiente paulatinamente, esto se debe a que la aceleración comienza a disminuir su valor a partir de los 0.5 kilómetros aproximadamente. Por su parte, la elevación o altitud de la ruta, en el rango donde la energía aumenta constantemente, se encuentra en subida, por lo que tiene sentido que el consumo energético aumente debido a que el vehículo necesita subir esta inclinación.

También, existe una disminución de la energía consumida a partir de los 0.1 kilómetros hasta los 0.4, aproximadamente. Al observar la elevación, se aprecia una pendiente negativa, es decir, el recorrido se encuentra en bajada, donde la aceleración tiene un valor negativo pues el conductor frena ante este descenso y, con esto, se logra una regeneración de energía, dicho de otra manera, se reduce el consumo energético.

Con tráfico

En cuanto a los gráficos de la Figura 4.2, correspondiente al trayecto con tráfico, para la ilustración de la energía en la rueda versus tiempo, existe un aumento por etapas del consumo energético. Estas etapas pueden ser divididas en tres: de 0 a 60 segundos, desde 200 a 320 segundos y entre 560 a 600 segundos, aproximadamente. Entre estos rangos existe disminución de la energía.

El comportamiento del aumento de energía en etapas, también se puede apreciar en el gráfico de energía en la rueda versus posición de la misma Figura 4.2, en este caso los rangos son: entre 0 y 0.6 kilómetros, 1.2 a 1.4 kilómetros y desde 1.8 a 2 kilómetros, aproxima-

mente. Donde también es posible observar una regeneración de energía entre ellas.

Al observar los gráficos de la Figura 4.8, se puede notar que, dentro de los rangos mencionados, la velocidad tiene una tendencia al aumento y, entre los intervalos, suele disminuir ligeramente. En cuanto a la aceleración, es posible observar que, dentro de los márgenes indicados, tiene valores positivos y, fuera de estos, posee mayoritariamente valores negativos, lo que guarda sentido pues indica que se regenera energía y por ende debe disminuir el consumo.

En cuanto a la elevación versus posición de la Figura 4.8, es posible observar que la forma general es una subida y una bajada, sin embargo, al profundizar en los puntos de los rangos mencionados, se puede apreciar que estos tienen pendientes positivas, con lo cual se vuelve necesario aumentar la velocidad, la aceleración y, por consecuencia, la energía para poder subirlos. El comportamiento descrito coincide con lo que ocurre en los datos. Además, es posible observar que, fuera de estos intervalos, la elevación no solo aumenta, sino que posee inclinaciones negativas donde el vehículo logra regenerar energía.

A diferencia del caso sin tráfico (Anexo B.1), este recorrido utilizó un trayecto distinto (Anexo B.2) que implicó una mayor distancia, por lo que es menos evidente la relación del consumo o regeneración de energía con el comportamiento de la velocidad, aceleración o altitud de la ruta.

5.2.2. Trayecto mediano

Sin tráfico

Respecto a los gráficos de la Figura 4.3, correspondiente al recorrido sin tráfico, es posible notar que la energía consumida va en constante aumento con una pequeña regeneración entre los 80 y 110 segundos, para el caso de los gráficos energía versus tiempo, y entre 2.4 a 2.6 kilómetros, para aquellos de energía versus posición. Además, al finalizar este incremento se observa una curva que tiene ligeras subidas y disminuciones en la energía.

Al observar los gráficos de la Figura 4.9, es posible notar que la velocidad aumenta y se mantiene constante en 27 metros por segundo (m/s), aproximadamente, para luego disminuir en el mismo rango de posición en el que se reduce la energía. Posterior a este intervalo, vuelve a aumentar para, finalmente, reducirse hasta casi 0 km/h.

En el caso de la aceleración, es evidente que se mantiene en 0 para la misma posición en la que la velocidad se mantiene constante, lo que tiene sentido, ya que, la velocidad aumenta o se reduce en 0 m/s. Además, presenta un valor bastante negativo entre los 2.4 y 2.6 kilómetros, es decir, el conductor frenó y regeneró energía, tal como se mencionó anteriormente.

En cuanto a la elevación del recorrido, se observa que la pendiente es positiva a partir del kilómetro de recorrido, es decir, se está en subida gran parte del trayecto con una pequeña bajada entre 2.4 y 2.6 kilómetros, lugar donde se coincide con la abrupta frenada que realizó el conductor, logrando una aceleración negativa y regenerando energía, tal como se indica en los párrafos anteriores.

Además, es importante indicar que este trayecto tiene como destino el aeropuerto, esto

hace normal que, al finalizar el trayecto, existan aumentos y disminuciones de la energía consumida pues, al llegar se debe acelerar y frenar constantemente debido al aumento de tráfico del sector.

Con tráfico

Respecto a los gráficos de la Figura 4.4, es posible notar que, para el caso de energía versus tiempo, se puede apreciar un constante aumento del consumo energético hasta llegar al rango entre 0.4 a 0.5 kilowatt hora (kWh), donde se mantiene una oscilación constante. Además, se observa una regeneración de energía al mismo tiempo que ocurre en el caso sin tráfico.

También, es posible notar que en el gráfico de energía versus posición, ocurre una situación similar, donde se tiene un aumento de la energía consumida hasta llegar al rango de 0.4 a 0.5 kWh, donde existe una oscilación constante dentro del intervalo. Al igual que en el caso de energía versus tiempo, este gráfico presenta una disminución del consumo energético en la misma posición que el recorrido sin tráfico, es decir, entre los 2.4 y 2.6 kilómetros.

En cuanto a los gráficos de la Figura 4.10, la velocidad aumenta abruptamente hasta mantenerse constante en 27 m/s, aproximadamente. Luego, disminuye entre 2.4 y 2.6 km para volver aumentar y, finalmente, reducirse a una oscilación constante inferior a 5 m/s. Lo anterior, coincide con el comportamiento de la aceleración, la que se mantiene en 0 para una velocidad de 27 m/s y luego disminuye bruscamente a valores negativos, donde el conductor regeneró energía debido a su freno. Además, tal como se mencionó, para la parte final de recorrido, la aceleración tiene constantes oscilaciones, lo que indica que el conductor realizó repetidas partidas y paradas del vehículo, generando reiterados aumentos y disminuciones en el consumo del mismo.

Al observar la elevación del trayecto, es posible notar que es bastante similar que el caso sin tráfico, algunas diferencias son apreciables y esto se puede deber, netamente, a errores de medición del equipo utilizado. Sin embargo, se logra identificar que el comportamiento descrito de la velocidad y la aceleración coinciden con el camino recorrido, pues la abrupta frenada que realiza el conductor concuerda con la bajada existente en el viaje.

Es importante destacar la similitud en el comportamiento de la energía para ambos recorridos, sin tráfico y con. La diferencia en la última etapa de estos se puede deber al mayor tiempo que le toma al segundo en llegar a destino, debido a la mayor aglomeración de vehículos en el aeropuerto. Más aún, es posible indicar que el recorrido desde la Copec hasta el Aeropuerto Internacional se puede realizar en 800 segundos aproximadamente, si es que no hay mucha congestión. Sin embargo, el viaje de la Figura 4.4 se demoró un 50 % más debido a la densidad vehicular en esta ubicación.

5.2.3. Trayecto largo

Sin tráfico

Respecto a los gráficos de la Figura 4.5, correspondiente al recorrido sin tráfico, se puede observar que la energía consumida oscila en valores muy bajos para luego ir en constante aumento hasta los 500 segundos, para el caso de la energía versus tiempo, punto en el cual el

incremento comienza a ser más paulatino. También, es posible notar la pequeña regeneración de energía existente entre los 450 y 500 segundos.

Un comportamiento similar, al descrito anteriormente, ocurre para el gráfico de energía versus posición de la Figura 4.3, donde el aumento constante ocurre hasta los 8.2 km, punto desde el cual el incremento es paulatino. Donde también es apreciable la regeneración de energía entre los 6 y 6.6 kilómetros.

Con respecto a los gráficos de la Figura 4.11, se puede visualizar que la velocidad oscila bastante en un inicio y a partir de los 2 kilómetros se mantiene constante con un ligero aumento en los 5 kilómetros y una disminución a los 6 km, para luego presentar una abrupta caída y terminar en grandes oscilaciones. En cambio, la aceleración presenta fluctuaciones de manera constante a lo largo del recorrido con variaciones en las amplitudes de estas. Por ejemplo, en el rango en que la velocidad es constante, la aceleración presenta pequeños cambios, lo que coincide con ese comportamiento.

Al observar la elevación, es evidente la abrupta bajada que existe a los 6 kilómetros, esta pendiente negativa coincide con la disminución en la velocidad, el valor negativo de la aceleración, es decir, la frenada realizada por el conductor, y la regeneración de energía existente en los gráficos de la Figura 4.3. Además, se aprecia las constantes subidas y bajadas luego de los 8 kilómetros de recorrido, lo que guarda relación con el aumento paulatino del consumo.

Con tráfico

Respecto a los gráficos de la Figura 4.6, correspondiente al recorrido con tráfico, se puede apreciar un constante aumento de la energía consumida hasta llegar a los 400 segundos (para el caso de la energía versus tiempo) punto desde el cual comienza a ser más plana la curva con ligeros aumentos al final de viaje. También, es posible notar que durante todo el trayecto se tienen pequeñas regeneraciones de energía, siendo quizás la más evidente la que ocurre entre los 300 y 350 segundos, aproximadamente.

El comportamiento que ocurre en el gráfico de energía versus posición es similar al descrito anteriormente; a lo largo de todo el trayecto se tiene un constante aumento de la energía consumida, con pequeñas regeneraciones, donde la más evidente ocurre entre los 5 y 6 kilómetros.

Al observar los gráficos de la Figura 4.12, se puede apreciar que la velocidad tiene grandes aumentos y disminuciones en su valor, mostrando una bajada paulatina entre los 4 y 6 kilómetros. La situación no es distinta para la aceleración, que tiene grandes oscilaciones a lo largo del recorrido, presentando una progresiva baja entre los 4 y 6 kilómetros, lugar que coincide con la pequeña regeneración de energía encontrada en los gráficos 4.6.a y 4.6.b.

En cuanto a la elevación, se vuelven a presentar diferencias con respecto al observado para el recorrido sin tráfico, lo que se puede deber, netamente, a un error de medición o que los puntos no se ubican en exactamente el mismo lugar en todo momento. Sin embargo, se puede apreciar la bajada existente entre los 5 y 6 kilómetros que coincide con la regeneración de energía y la aceleración negativa.

Cabe mencionar que, tiene sentido que el consumo energético de las figuras 4.5 y 4.6 vayan en aumento, pues al ser un trayecto que se realiza mayoritariamente en carretera, el vehículo tiene menores posibilidades de regenerar energía, lo que provoca un aumento en su consumo y una disminución en su rendimiento. En este caso, el efecto de la forma del camino no afectó en gran medida el comportamiento de la energía.

En cuanto a los rendimientos, apreciables en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4, es posible indicar, tal como se mencionó anteriormente, que el mejor rendimiento lo presenta el trayecto mediano con un valor de 0.089 [kWh/km] y el peor lo tiene el trayecto largo con 0.132 [kWh/km].

Lo esperable es que el mejor rendimiento lo tuviese el trayecto 100 % urbano, en este caso, el trayecto corto. Sin embargo, la velocidad promedio, las paradas frecuentes y las aceleraciones constantes hacen variar bastante el consumo de energía. En este corto tramo urbano, la velocidad presenta grandes variaciones en un pequeño recorrido, esto sumado a la energía que conlleva arrancar el vehículo, pueden ser las causantes de que el viaje más eficiente sea el mediano cuyas características son un mix entre carretera y urbano.

Lo anterior, tiene más sentido al observar los rendimientos de la Tabla 4.5, donde se divide el trayecto largo en cuatro tramos, tal como se aprecia en la Figura C.1 del Anexo. Se aprecia que los rendimientos de los tramos 1 y 3 son significativamente menores a los tramos 2 y 4, pasando desde un 0.077 [kWh/km] y 0.066 [kWh/km] a unos 0.105 [kWh/km] y 0.131 [kWh/km], respectivamente.

Tal como se mencionó, una de las razones de estas diferencias puede ser la capacidad del vehículo eléctrico para regenerar energía durante el frenado, lo que ocurre con mayor frecuencia en áreas urbanas donde las detenciones son más comunes. En las carreteras, donde la velocidad es más constante y no hay tantas oportunidades para una regeneración, el consumo tiende a ser mayor.

También, cabe señalar que los valores obtenidos para el rendimiento son mejores que el número esperado de 0.149 [kWh/km], esto puede ocurrir debido a que, independiente del trayecto que se recorre, el camino presenta constantes desniveles que invitan al conductor a frenar, regenerando energía y reduciendo el consumo.

Otras causantes de tener un mejor o peor rendimiento es el perfil del conductor, un chofer que suba mucho la velocidad y que suela recorrer su camino de forma apresurada va a consumir más energía que aquel que mantenga una velocidad promedio más estable. También, se encuentra las condiciones del ambiente, el estado de la pista que se utiliza o, en caso de utilizar distintos modelos de vehículos, el área frontal del medio de transporte, los cuales corresponden a factores que afectan directamente a la misma ecuación matemática 2.12 utilizada para el cálculo de la energía consumida.

5.3. Análisis del comportamiento energético de los recorridos

Con respecto al gráfico de la Figura 4.13, se puede observar que la energía consumida en la rueda varía bastante entre recorridos. Tiene sentido que las diferencias sean más notorias para el trayecto corto debido a que este presenta 2 posibles caminos, lo que genera variaciones en el tiempo transcurrido y la distancia transitada, tal como se observa en la Tabla 4.10.

A diferencia del trayecto corto, el gráfico de la Figura 4.14, correspondiente al trayecto mediano, presenta una energía consumida en la rueda más estable entre recorridos, que varía dentro del rango 0.4 - 0.6 [kWh], esto tiene sentido pues todos los viajes utilizan la misma ruta.

Algo similar ocurre en relación al gráfico 4.15, correspondiente al trayecto largo, donde la energía consumida en la rueda, entre recorridos, varía entre 0.98 y 1.22 [kWh]. Nuevamente, este comportamiento tiene sentido pues se utiliza la misma ruta.

Las principales razones de las diferencias de energías entre los 3 gráficos mencionados pueden deberse a:

- El perfil de conducción del chofer, pues un conductor que mantenga altas variaciones en su velocidad promedio va a generar mayor consumo en comparación a otro que mantenga este factor constante.
- La densidad vehicular en la ruta, ya que al existir mayor tráfico, mayor será el tiempo en que la batería esta prendida y más frenadas, y partidas, se tendrán que realizar.
- Las condiciones climáticas, dado que factores como la lluvia, afectan la conducción del vehículo.

Sin embargo, pese a todas las razones dadas para las diferencias, se puede notar que los recorridos tienen, en su mayoría, un consumo similar para cada trayecto mencionado.

Más aún, se puede observar en el gráfico 4.16 la energía consumida en la rueda para cada recorrido a lo largo de la ruta para el trayecto corto. Como bien se mencionó, en este tipo de trayecto hay grandes variaciones debido a los dos caminos distintos utilizados para llegar desde un punto a otro, sin embargo, es posible observar una tendencia en el primer kilómetro, donde el consumo energético aumenta.

En cambio, al observar el gráfico 4.17, es evidente que existe un patrón más claro y definido. Se puede apreciar un aumento de la energía consumida hasta los 2.5 kilómetros, aproximadamente, donde existe una notoria regeneración, para luego volver a aumentar. Al recordar los gráficos de las figuras 4.9 y 4.10, tiene sentido la reducción del consumo en el punto indicado, pues en el existe una disminución en la velocidad, un valor negativo en la aceleración y una pendiente negativa en la elevación. En algunos recorridos es mayor o menor el consumo o regeneración, pero el comportamiento de todos es similar.

Por su parte, el gráfico 4.18, también presenta un patrón definido con un constante aumento del consumo energético, ligeras regeneraciones a lo largo del camino, y una bastante

notoria que se repite entre todos ubicada en la etapa final el viaje. Es posible notar que las regeneraciones encontradas en la zona central de la ruta, al evaluar los recorridos con menor y mayor tráfico en la sección anterior, no son aplicables a todos los casos y, a diferencia de lo anterior, la visión general de este trayecto indica que el comportamiento de la energía es ir en un incremento continuo con una pequeña disminución al final.

Como bien se mencionó en los párrafos anteriores, al estudiar el comportamiento del consumo energético a lo largo del mismo camino, se observan los mismos patrones para distintos recorridos, lo que puede indicar que los valores energéticos que se obtengan al recorrer esa ruta sean similares a los plasmados en los resultados.

Más aún, al separar los trayectos medianos y largos en tramos de un kilómetro cada uno, se obtienen los resultados de las tablas 4.6 y 4.7, respectivamente.

Para el caso del trayecto mediano, al observar el gráfico de la Figura 4.19, se puede notar un consumo energético con un gran aumento en los primeros 3 km que suaviza su incremento hacia el final del recorrido. Esto, se evidencia de mejor manera en la columna de rendimiento de la Tabla 4.6, donde el consumo por kilómetro tiene valores altos al inicio y disminuyen al final.

También, es posible notar la línea punteada en el gráfico de la Figura 4.19, la que corresponde a un consumo teórico lineal con una pendiente de $0.1[\text{kWh}/\text{km}]$, al comparar el comportamiento de ambas, se puede apreciar que la energía consumida promedio no sigue una tendencia rectilínea, sino que es aparentemente curvilínea, con un gran aumento inicial que se suaviza al finalizar el recorrido.

En el caso del trayecto largo, se tiene el gráfico de la Figura 4.20, se puede notar un consumo aproximadamente constante con pequeñas oscilaciones al finalizar el recorrido. Esto, se evidencia en el rendimiento de la Tabla 4.7, los que tienen valores muy cercanos a la curva teórica lineal de $0.1 [\text{kWh}/\text{km}]$, excepto por los rendimientos del tramo 9 al 11, que se encuentran alejados de este número.

Además, es posible notar que, tanto para el trayecto mediano como para el trayecto largo, la tendencia muestra que al aumentar la velocidad, lo hará también el consumo. Sin embargo, existen puntos en lo que esto no ocurre, tal como se observa en el tramo 1 y 2 de la Tabla 4.6, donde las velocidades son 72.6 y $90.3 [\text{km}/\text{h}]$, respectivamente, la lógica indicaría que en el tramo con mayor rapidez, más energía se consumirá, pero lo que en realidad se tiene es un valor menor, esto se puede deber a que el primer kilómetro está ligado al arranque del vehículo, lo que conlleva a mayores variaciones, afectando directamente al consumo.

Algo similar ocurre entre otros puntos, por ejemplo, entre los tramos 4 y 5 de la Tabla 4.6 o los tramos 9 y 10 de la Tabla 4.7, donde la velocidad disminuye y el consumo aumenta. Una de las posibles causas de este comportamiento se puede deber a factores externos como problemas en la ruta, existencia de mayor o menor tráfico, entre otras situaciones. O también, se puede deber a grandes variaciones en la rapidez del vehículo, las que afectan de manera directa a la energía consumida.

Con respecto a los comportamientos de los consumos energéticos promedio de los trayectos medianos y largos, es posible notar que, este último, sigue un aumento lineal que difiere de la conducta curvilínea del primero, esto se puede deber, principalmente, a las constantes regeneraciones que presenta el viaje mediano al final del recorrido debido a que pasa de una ruta en carretera a una urbana. Lo anterior, tiene sentido pues el camino en autopista no posee muchas oportunidades de recuperar energía, lo que conlleva a no tener mayores variaciones.

En el gráfico de la Figura 4.21 se pueden observar las curvas del consumo por tramos para los recorridos de mayor y menor consumo del trayecto largo, además de la recta de consumo lineal con una pendiente de 0.1 [kWh/km] . Es posible notar que la curva naranja inicia el camino con un gasto energético superior en el primer kilómetro que se ve reducido al llegar al segundo.

Lo anterior, se debe principalmente a que el viaje de menor consumo inicia con una velocidad más grande que el recorrido de mayor gasto y, para el segundo kilómetro, realiza una gran reducción en su rapidez, lo que conlleva a una gran regeneración de energía, alcanzando un valor energético similar al trayecto con mayor consumo pues este no disminuye nunca su velocidad, solo la aumenta, tal como se aprecia en las Tablas 4.9 y 4.8, respectivamente.

Nuevamente, en el kilómetro 5 se observa que la curva del recorrido de menor consumo supera a aquella de mayor gasto, sin embargo, en el kilómetro 6 vuelve a reducir su valor. Esto, se debe principalmente a que la velocidad del trayecto correspondiente a la curva naranja vuelve a disminuir su velocidad, como se plasma en la Tabla 4.9, pasando de 93.9 [km/h] en el quinto tramo a 75.14 [km/h] en el sexto, lo que regenera energía. En cambio, el viaje de la curva azul aumenta su velocidad, tal como se observa en la Tabla 4.8 desde 86.91 [km/h] a 103.09 [km/h] , con lo cual aumenta la energía consumida.

Ya hacia el final del gráfico de la Figura 4.21, se puede notar una brecha entre ambas curvas, donde la azul supera al consumo lineal de 0.1 [kWh/km] y la naranja se encuentra por debajo de esta. Si bien las dos tienen un aumento suave en el consumo energético, la brecha nace por lo ocurrido entre el kilómetro 7 y 8.

Es ahí donde el recorrido de menor consumo vuelve a reducir su velocidad, tal como se observa en la Tabla 4.9, pasando desde 57.4 [km/h] , para el séptimo tramo, a 26.5 [km/h] en el octavo, lo que reduce su consumo debido a la regeneración realizada. En cambio, el trayecto de mayor consumo aumenta ligeramente su rapidez, como se aprecia en la Tabla 4.8, desde 90.6 [km/h] a 91.18 [km/h] para los mismos tramos, existiendo un aumento en su consumo.

5.4. Análisis del consumo energético por el sistema de climatización

Al observar el gráfico de la Figura 4.22 se puede apreciar las diferencias para cada mes en el consumo por el sistema de climatización para el trayecto corto. Donde se tienen grandes valores para enero que se van reduciendo con el paso de estos meses. Esto guarda sentido con la ecuación 2.3 y las “Temperaturas estacionales” de la Tabla 3.3, pues enero presenta la

mayor temperatura y, por consecuencia, el mayor consumo energético por segundo, tal como se plasma en el gráfico de la Figura 4.25 y la Tabla 4.13.

No obstante, la temperatura no es lo único que afecta en la energía final consumida, sino que también lo hace el tiempo total del viaje, por ejemplo, el recorrido número 3 de la Tabla 4.10 se realizó en el mes de enero y tardó un total de 750 segundos, resultando en 0.4 [kWh] de consumo llegando a ser casi un 60% más que los 0.25 [kWh] del recorrido 2, cuyo tiempo es de 470 segundos.

Respecto al gráfico de la Figura 4.23, se pueden observar los diferentes consumos de los recorridos para cada mes del trayecto mediano. Se puede notar que los mayores valores se presentan para enero y febrero, donde no se observa una gran diferencia entre estos, distinto es el caso de marzo y abril donde la energía tiene valores más bajos.

Lo anterior, tiene sentido pues la diferencia de temperaturas entre enero y febrero es de 0.547 [°C], en cambio, entre febrero y marzo varía en 1.35 [°C], es decir, más del doble que el valor anterior. Esto se vuelve aún más notorio al pasar de marzo a abril donde la desigualdad es de 4.252 [°C]. Al considerar también la duración de cada recorrido es que se entienden los grandes valores del consumo alcanzados por los recorridos 8 y 9, con 870 y 1245 segundos, respectivamente, tiempos que distan bastante de los apenas 310, 315 y 375 segundos que tardaron los viajes de marzo y abril.

En cuanto al gráfico de la Figura 4.24, se pueden notar los consumos de los recorridos para cada mes del trayecto largo, nuevamente no se aprecian grandes diferencias entre enero y febrero, además, el viaje número 4 presenta la mayor energía y, a su vez, el mayor tiempo total, con valores de 0.7 [kWh] y 1510 segundos, respectivamente.

Es posible notar que los comportamientos, de las energías consumidas, plasmados en los gráficos anteriores, guardan sentido tanto para las diferencias dentro de un mismo mes, debido al tiempo transcurrido en cada recorrido, y entre ellos, gracias a las “Temperaturas estacionales”. Se observa que mientras mayor es del trayecto, mayor será su consumo, esto también ocurre mientras mayor sea la temperatura ambiente.

Respecto al gráfico de la Figura 4.25, se observan dos curvas ligadas al consumo energético por el sistema de climatización: la energía gastada por segundo y la potencia, para cada mes del año. Dentro de esto, los valores positivos corresponden al uso del sistema de enfriamiento, en cambio, los negativos corresponden al gasto ligado al sistema de calefacción.

Bajo esta premisa, tiene sentido el comportamiento de ambas características pues, para los meses en que Santiago se encuentra en etapas calurosas, la energía tiene un valor positivo, y por otro lado, en aquellas épocas en que hay frío, se tienen valores negativos.

5.5. Análisis del efecto del horario en el consumo energético

Respecto a la Tabla 4.14, obtenida en base al trayecto extra visualizado en la Figura B.5 del Anexo, se pueden observar los diferentes horarios y meses en los que se realizaron los distintos recorridos, además de la energía consumida en cada uno. Es evidente que el consumo varía dentro de un pequeño rango que va desde 2.053 hasta 2.780 [kWh], lo que es lógico pues se utiliza siempre la misma ruta.

En la Tabla 4.15 se tiene el promedio de la energía para cada rango horario, donde además se muestra la diferencia porcentual que poseen los rangos de la mañana y la noche con respecto a la tarde. Se puede observar que ambos intervalos tienen un consumo menor que el de la tarde, esto se puede deber a que en este último periodo se suele presentar mayores tráficos y temperaturas.

Por último, en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18, se presentan los consumos ligados a cada trayecto. En base a estas, se puede indicar que un conductor de un EV, que quiera recorrer desde el metro Escuela Militar hasta el Hotel Hilton, consumirá, al ver la energía eléctrica, un total de 0.132 [kWh] si es que se realiza en la mañana, 0.135 [kWh] si es que es en la tarde y 0.133 [kWh] si es que se recorre en la noche. Del mismo modo, se puede indicar el consumo energético para los trayectos medianos y largos, según el horario en el que se vaya a realizar el recorrido.

Capítulo 6

Conclusiones

Este estudio ha proporcionado una comprensión integral del comportamiento del consumo energético de un vehículo eléctrico (EV) bajo diversas condiciones del trayecto, entre ellos se encuentran, tal como se mencionó antes, la velocidad, la aceleración, la altitud de la ruta, el horario y la estación, además de analizar la cantidad de frenadas, subidas y bajadas que se recorrieron.

Mediante un meticuloso análisis de los diferentes tipos de trayectos: corto, mediano y largo, se pudo observar que la distancia y la duración del trayecto influyen significativamente en la energía consumida por el vehículo. Los hallazgos sugieren que los trayectos más largos y con mayor velocidad promedio demandan más energía debido a la mayor resistencia y al uso prolongado del sistema de climatización. Este último, resulta ser uno de los más afectados por la duración del recorrido y la época del año en que se realiza, por lo que se vuelve un factor clave en el consumo energético.

En particular, se identificó que los vehículos eléctricos tienen un rendimiento superior en entornos urbanos en comparación con las carreteras, tal como se observa en la Tabla 4.5. Este rendimiento mejorado se debe en gran parte a la capacidad del EV para regenerar energía durante el frenado, lo cual es más frecuente en áreas urbanas debido a la necesidad de detenerse y arrancar constantemente. Por el contrario, en las carreteras, donde la velocidad suele ser constante y tener menor necesidad de frenar, el consumo energético es mayor.

Esto permite destacar la importancia de optimizar las rutas de los vehículos eléctricos para maximizar su eficiencia energética. Estos resultados sugieren que, para optimizar el rendimiento de los vehículos eléctricos, es fundamental planificar rutas que aprovechen las características urbanas, particularmente en trayectos largos, donde el consumo tiende a incrementarse debido a la falta de regeneración.

Como bien se indicó, este estudio también ha revelado la variabilidad del consumo energético en función del horario del día. Se determinó que el consumo durante la tarde es ligeramente superior al de otros bloques horarios, lo cual se puede atribuir a factores ambientales como la temperatura y condiciones del tráfico, que suelen ser más intensas durante estas horas.

Lo anterior, se vuelve relevante para la planificación de rutas y la gestión de flotas de vehículos eléctricos, planteando la idea de que se pueden lograr ahorros energéticos significa-

tivos mediante una planificación adecuada del horario de operación. Por ejemplo, evitar los horarios pico no solo puede reducir el consumo de energía, sino también mejorar la eficiencia operativa al reducir el tiempo de viaje.

Además, el uso de herramientas tecnológicas como Python y Google Earth fueron fundamentales para el análisis de los datos. Estas permitieron categorizar y agrupar de manera eficiente los datos de cada viaje, así como implementar un modelo de consumo energético preciso.

El modelo desarrollado ha proporcionado información valiosa sobre la autonomía del vehículo eléctrico y los factores que la afectan, incluyendo la pendiente del recorrido, la velocidad y la aceleración, sin contar las condiciones ambientales, la longitud del trayecto y la duración total de estos.

Este enfoque analítico permitió tener una comprensión más profunda de cómo diferentes variables influyen en el modelo de consumo energético y como este se comporta a lo largo de la ruta, lo cual es esencial para el desarrollo de estrategias de optimización.

También, fue posible proponer un consumo energético aproximado para tres rutas distintas con énfasis en el horario en que cada una se realiza. Concluyendo que, para el recorrido desde metro Escuela Militar hasta el Hotel Hilton se tendrá un gasto energético equivalente al que se muestra en la Tabla 4.16, para ir desde la Copec de la Autopista Costanera Norte kilómetro 33.75 hasta el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez se consumirá la energía de la Tabla 4.17 y, al iniciar en Los Presidentes 1498, Maipú y finalizar en la Copec de la Autopista Costanera Norte kilómetro 33.75, se consumirá el equivalente a los valores de la Tabla 4.18.

Finalmente, el estudio sugiere que un perfil de conducción con velocidades promedio estables, donde se reduzca la variabilidad, y un uso adecuado del sistema de climatización pueden ayudar a optimizar el consumo energético. Lo anterior, sumado a posibles mejoras en el diseño y configuración de los futuros vehículos eléctricos por parte de los fabricantes, permitirá un futuro con una matriz energética ideal en el área del transporte para los vehículos eléctricos y una reducción en su consumo de energía.

6.1. Recomendaciones y trabajo futuro

Con el objetivo de mejorar, perfeccionar y completar el trabajo realizado en este estudio se proponen los siguientes puntos:

1. Profundizar en las temperaturas utilizadas para el modelo lineal. Esto se puede realizar buscando data histórica para las temperaturas correspondientes a la fecha y hora en la que se realizó cada recorrido. Esto permitiría tener un valor real del consumo ligado al sistema de climatización y ayudaría también a poder diferenciar su uso en cada horario.
2. Utilizar un nuevo método para el consumo respecto al sistema de climatización. El modelo lineal, empleado para calcular la energía utilizada debido al aire acondicionado, puede estar sobre estimando el valor real. Por lo que utilizar uno nuevo que considere diversos factores como el intercambio térmico con el ambiente, entre el vehículo y la

cabina, o cualquier otro que pueda presentarse. De esta manera se puede acceder a valores más acertados.

3. Aumentar la cantidad de recorridos para cada ruta establecida. Al tener más y variados comportamientos con diferentes horarios y fechas se puede tener mayor exactitud con respecto al consumo energético que conllevaría realizar cada viaje y comprender con mayor profundidad el efecto de las condiciones de operación en el gasto energético.
4. Masificar las rutas establecidas. Con esto, sería posible desarrollar un mapa de consumo energético en el que un usuario pueda indicar el recorrido a realizar y, a través de esto, determinar la energía aproximada a gastar en el viaje.

Bibliografía

- [1] Achariyaviriya, W., Wongsapai, W., Janpoom, K., Katongtung, T., Mona, Y., Tippayawong, N., y Suttakul, P., “*Estimating energy consumption of battery electric vehicles using vehicle sensor data and machine learning approaches.*”, *Energies*, 16(17), 6351, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en16176351>
- [2] Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC), [en línea] <<https://www.anac.cl/la-generacion-z-apuesta-por-la-electromovilidad/>>. (Consulta: 12 de junio 2024).
- [3] Biblioteca del congreso nacional de Chile (BCN), “*Electromovilidad: Tendencias y experiencia nacional e internacional*”, Asesoría Técnica Parlamentaria, 2019.
- [4] Blanco, A., T., “*¿Qué es y cómo calcular la potencia eléctrica?*”, BBVA Creative, [en línea] <<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-y-como-calcular-la-potencia-electrica/>>. (Consulta: 13 de junio 2024).
- [5] Bley, C., “*¿Qué pasa con la electromovilidad en Chile?*”, Desafía Ciencia, [en línea] <<https://desafiaciencia.cl/que-pasa-con-la-electromovilidad-en-chile/>>. (Consulta: 12 de abril 2024).
- [6] Centro de Energía FCFM y Ministerio de Energía, “*Informe proyecto ruta sustentable*”, 2021.
- [7] Centro Mexicano de Derecho Ambiental, “*Emisiones del sector transporte: Urge acelerar el cambio tecnológico y cultural*”, [en línea] <<https://www.cemda.org.mx/cop28/emisiones-del-sector-transporte-urge-acelerar-el-cambio-tecnologico-y-cultural/>>. (Consulta: septiembre 2023).
- [8] Chanpeng, W., y Hachanont, P., *Design of efficient in-wheel motor for electric vehicles*, *Energy Procedia*, 56, 525–531, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.188>
- [9] Chapra, C., S., y Canale, P., R., “*Métodos numéricos para ingenieros: Quinta edición*”, McGraw Hill, p. 516-518, 2007.
- [10] Comisión Europea, “*Causas del cambio climático*”, [en línea] <https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es>. (Consulta: septiembre 2023).
- [11] 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: 13 de julio 2024).
- [12] Ejsmont J. A., Ronowski G., y Wilde W. J., “*Rolling resistance measurements at the MnROAD facility*”, No. MN/RC 7, 2012.
- [13] Electric Vehicle Database, “*Energy consumption of full electric vehicles*”, [en línea] <<https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>>. (Consulta: 20 de

mayo 2024).

- [14] Enel X, “*ElectroRuta Enel X instalará más de 140 nuevas estaciones de recarga en 2021, para alcanzar un 30 % de avance, logrando una cobertura en todo el país*”, Enel, [en línea] <<https://www.enel.cl/es/conoce-enel/prensa/press-enel-x/d202103-electroruta-enel-x.html>>. (Consulta: 20 de marzo 2024).
- [15] Fernández, A., “*Bomba de calor, qué es y cómo funciona un componente clave para los coches eléctricos*”, Motor.es, [en línea] <<https://www.motor.es/noticias/bomba-de-calor-coches-electricos-202068189.html>>. (Consulta: 11 de marzo 2024).
- [16] Fiori, C., Ahn, K., y Rakha, A. H., “*Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation*”, Elsevier Ltd., 168, pp. 257–268, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097>
- [17] Hyundai Motor Company, “*Conduciendo Innovación: Ioniq Hybrid and Electric*”, [en línea] <<https://hyundai.cl/content/uploads/ioniq-electrico-2.pdf>>. (Consulta: noviembre 2023).
- [18] Hyundai Motor Company, “*Ficha Técnica Hyundai Ioniq*” [en línea] <<https://www.hyundai.cl/content/uploads/ficha-tecnica-ioniq-21.5x28-cm.-1-1.pdf>>. (Consulta: 21 de noviembre 2023).
- [19] Inquieto, “*Bombas de calor en vehículos eléctricos: ¿Para qué sirven?*”, [en línea] <<https://www.soyinquieto.com/blog/bombas-de-calor-en-vehiculos-electricos-para-que-sirven/>>. (Consulta: 11 de marzo 2024).
- [20] Iwansson, K., Sinapius, G., Hoornaert, W., y Middelhoek S., “*Measuring Current, Voltage and Power: Volume 7*”, Elsevier science, p. 34, 1999.
- [21] MathWorks, “*Interpolación*”, [en línea] <<https://es.mathworks.com/help/matlab/interpolation.html>>. (Consulta: 20 de marzo 2024).
- [22] Mebarki, B., Draqui, 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. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/935784>
- [23] Ministerio de Energía, “*Explorador Solar*”, [en línea] <<https://solar.minenergia.cl/exploracion>>. (Consulta: 10 de julio 2023).
- [24] Ministerio de Energía, “*Plataforma de electromovilidad - beneficios de la electromovilidad.*”, [en línea] <<https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion/beneficios-de-la-electromovilidad>>. (Consulta: octubre 2023).
- [25] Montoya, A., “*Electromovilidad en Chile 2020*”, Asociación gremial de vehículos eléctricos de Chile (AVEC), 2019.
- [26] 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. doi:<https://doi.org/10.3390/en13184675>
- [27] Ocaranza, C., “*Análisis dinámico del consumo energético por confort térmico de la cabina de un vehículo eléctrico en Chile*”, Universidad de Chile, 2022.
- [28] Ozbicakci, V., “*Electromovilidad en Chile: novedades y tendencias para el 2024*”, Chileautos, [en línea] <<https://www.chileautos.cl/noticias/detalle/electromovilidad-en-chile>>

- le-novedades-y-tendencias-para-el-2024--29481/>. (Consulta: 20 de marzo 2024).
- [29] Plaza, D., “*Calefacción en un coche eléctrico: ¿cómo funciona y cuánto gasta?*”, Motor.es, [en línea] <<https://www.motor.es/noticias/calefaccion-coche-electrico-202176788.html>>. (Consulta: 11 de marzo 2024).
- [30] SGS ITV, “*La eficiencia del motor: qué es y qué tipos existen*”, [en línea] <<https://www.serviciositv.es/blog/consejos/la-eficiencia-del-motor-que-es-y-tipos>>. (Consulta: 14 de marzo 2024).
- [31] 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. doi:<https://doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077224>
- [32] Torrance, K., y Jaluria, Y., “*Computational Heat Transfer 2^o ed*”, Taylor Francis, 2003.
- [33] Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., y Kitch, A. W., “*Electric vehicles’ energy consumption measurement and estimation*”, Elsevier Ltd., 34, pp. 52-67, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.007>
- [34] 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.
- [35] 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. doi: <https://doi.org/10.3390/wevj11010023>

Anexos

Anexo A. Acumulación de puntos

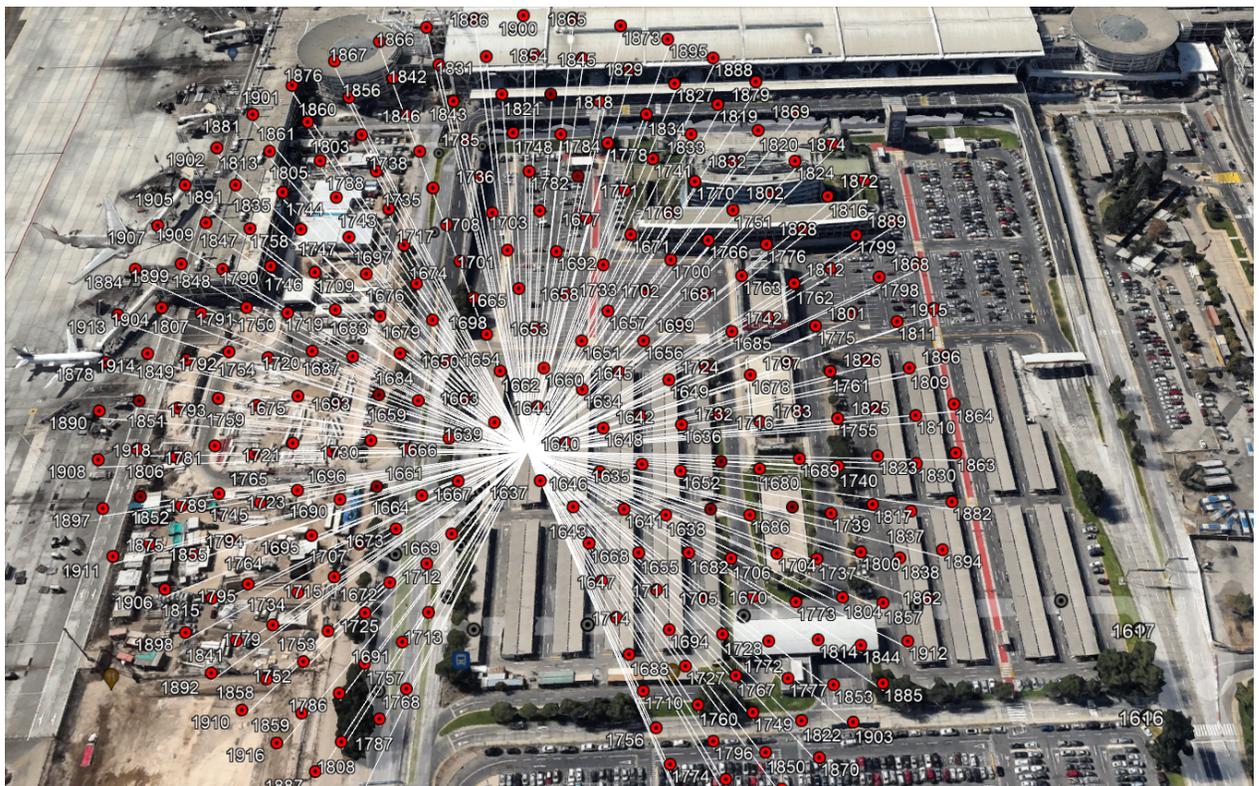


Figura A.1: Cúmulo de puntos en una misma ubicación geográfica para un solo viaje.

Anexo B. Rutas seleccionadas

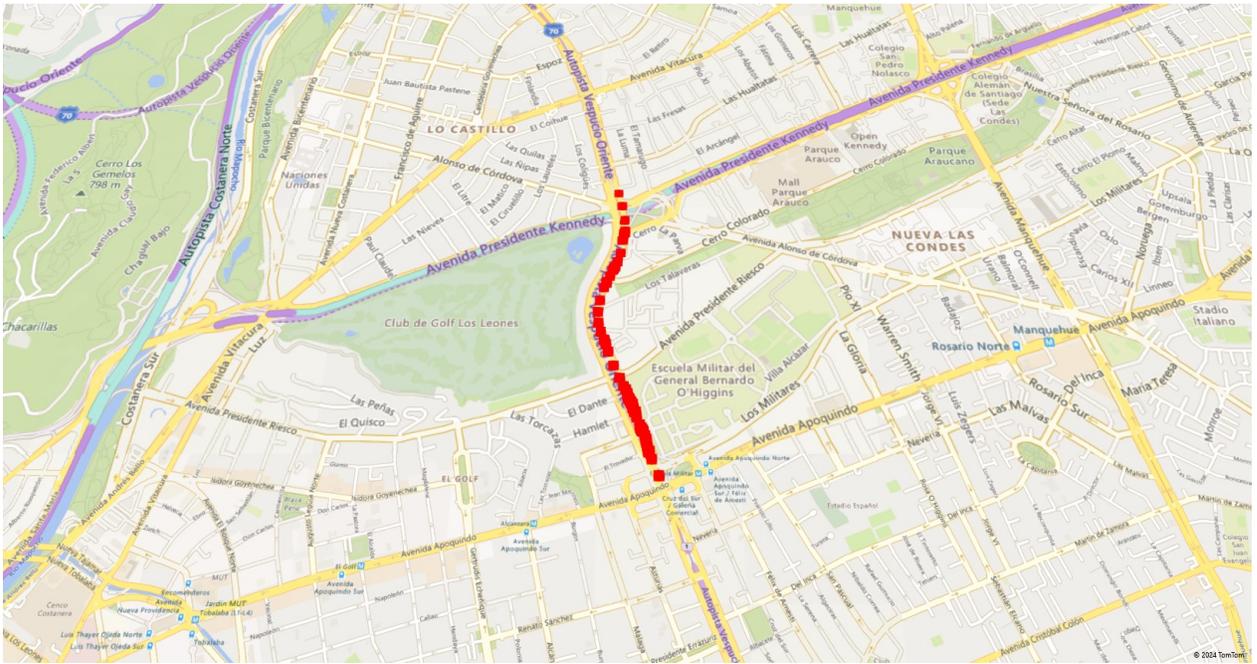


Figura B.1: Trayecto corto: Metro Escuela Militar - Hotel Hilton camino 1.

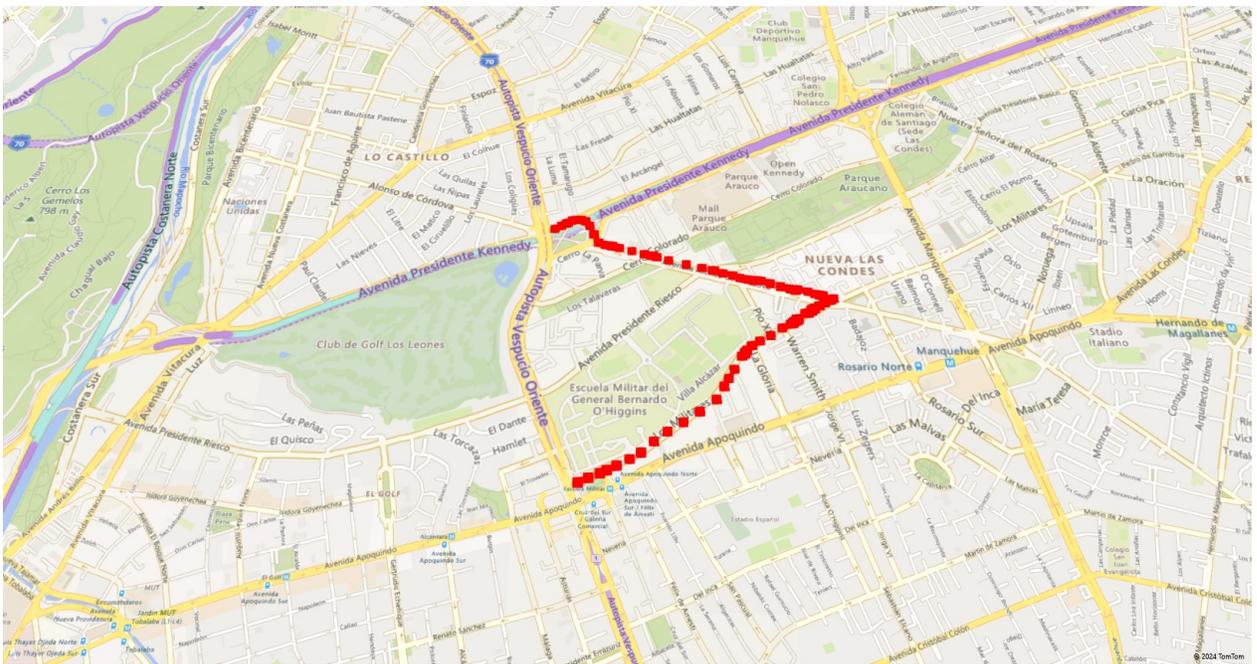


Figura B.2: Trayecto corto: Metro Escuela Militar - Hotel Hilton camino 2.

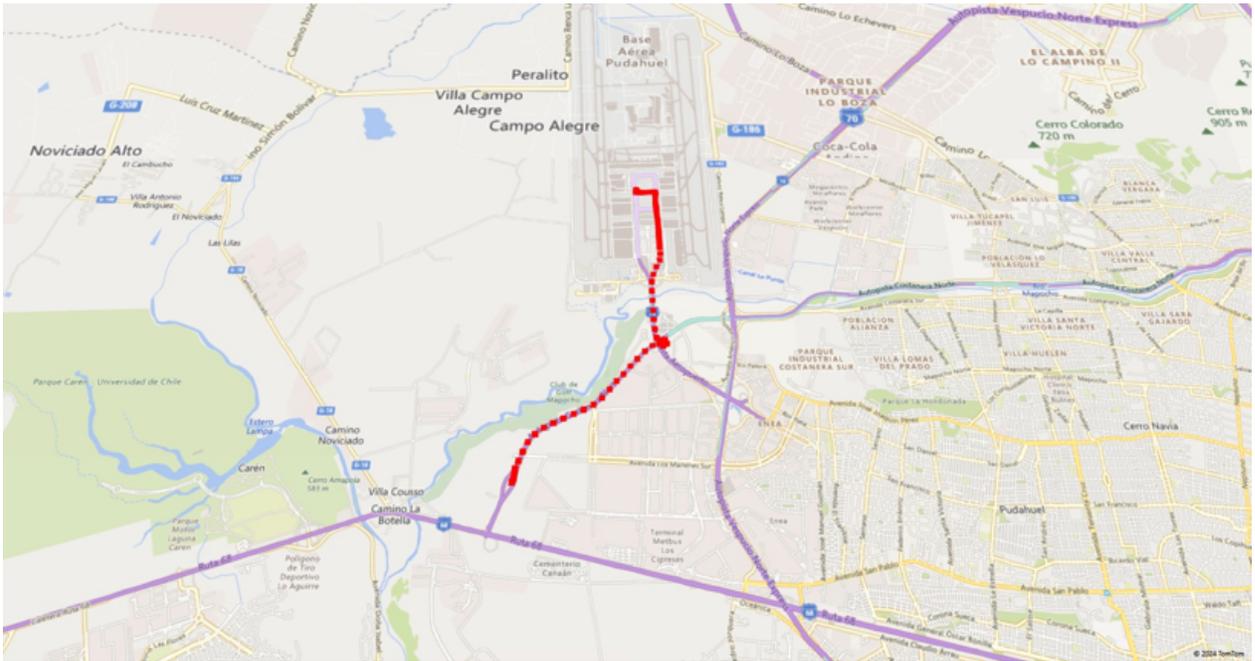


Figura B.3: Trayecto mediano: Copec Costanera Norte km 33.75 - Aeropuerto Arturo Merino Benítez.

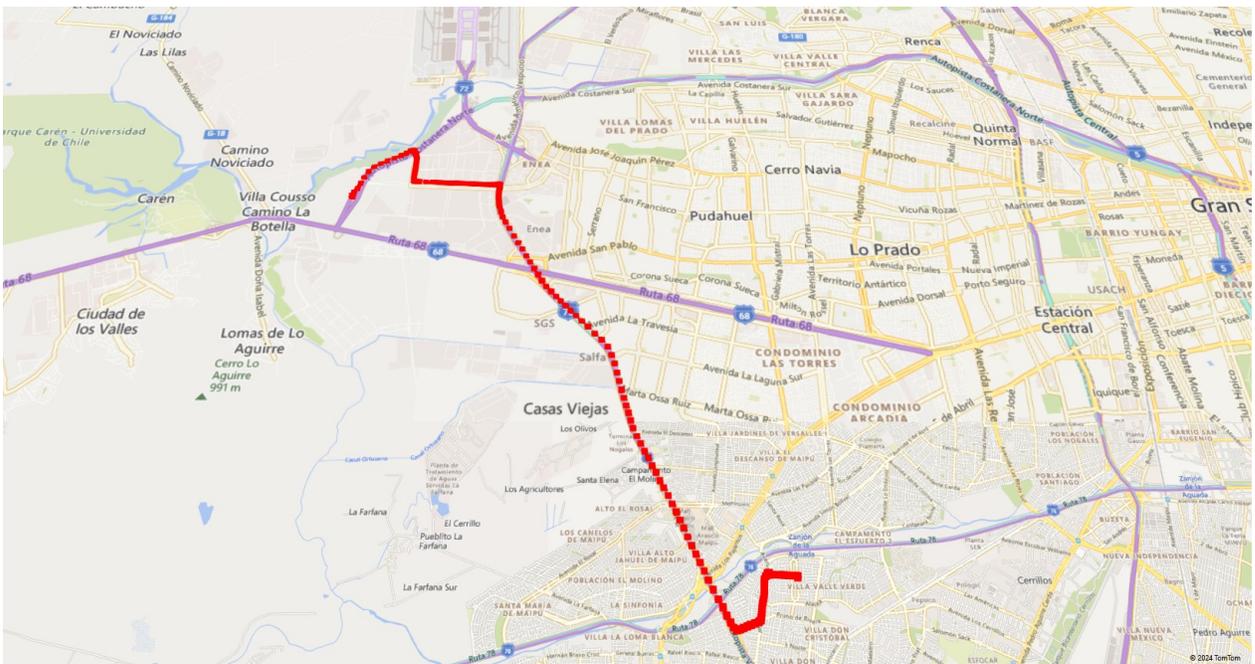


Figura B.4: Trayecto largo: Los presidentes 1498, Maipú - Copec Costanera Norte km 33.75.

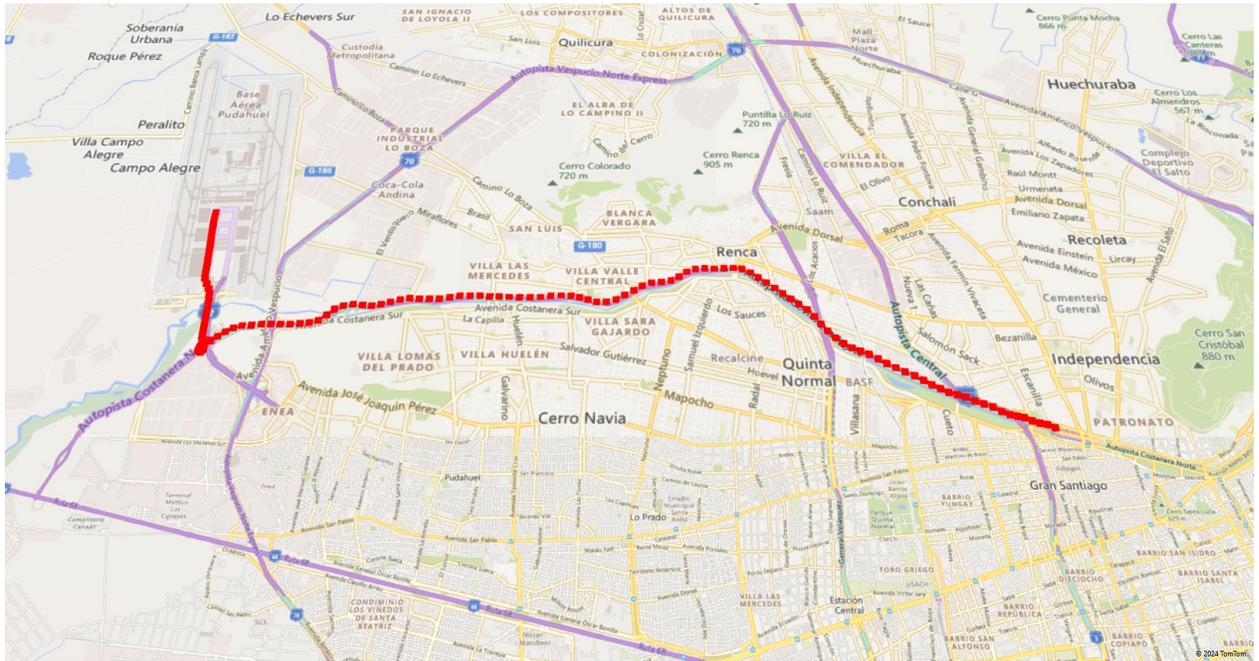
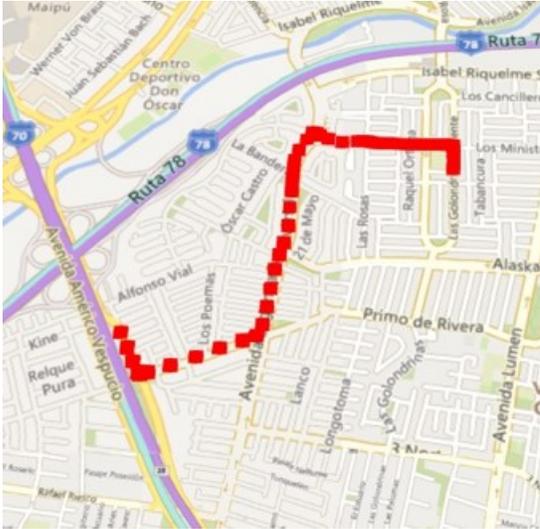
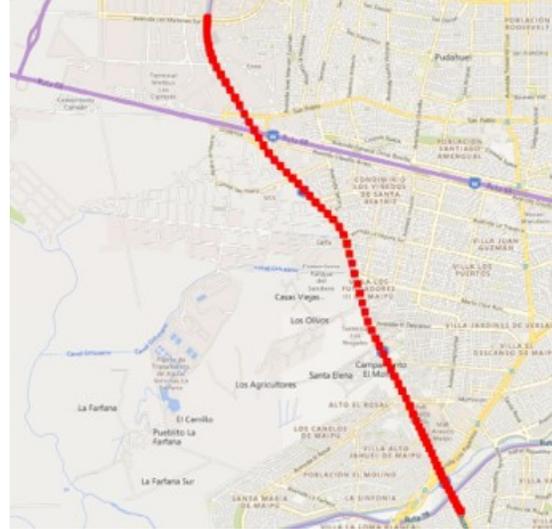


Figura B.5: Trayecto extra para horarios: Aeropuerto Arturo Merino Benítez - Túnel Costanera Norte Gral. Prieto 1430, Independencia.

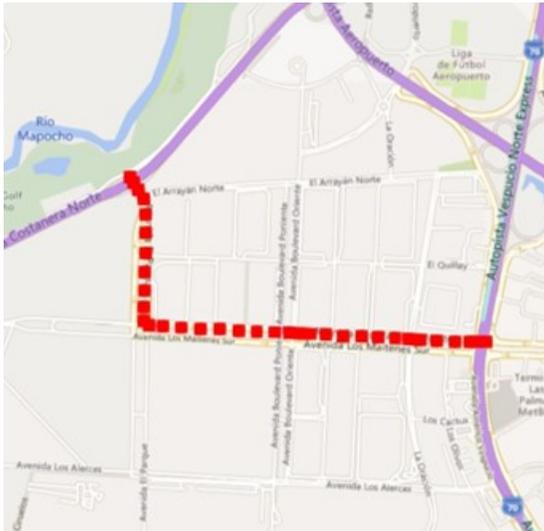
Anexo C. División por tramos



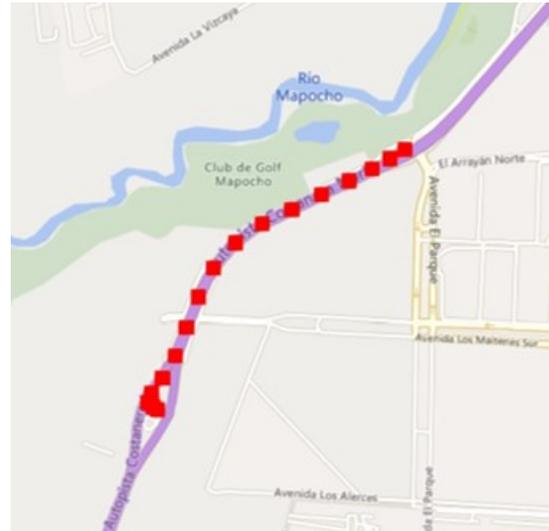
(a) Tramo 1, ruta urbana.



(b) Tramo 2, ruta en carretera.



(c) Tramo 3, ruta urbana.



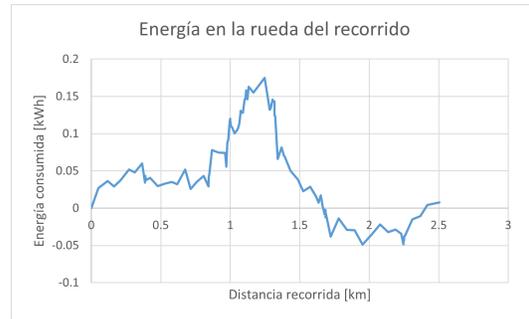
(d) Tramo 4, ruta en carretera.

Figura C.1: División realizada al trayecto largo de la Figura B.4 del Anexo.

Anexo D. Consumo energético de recorridos no analizados para los trayectos corto, mediano y largo



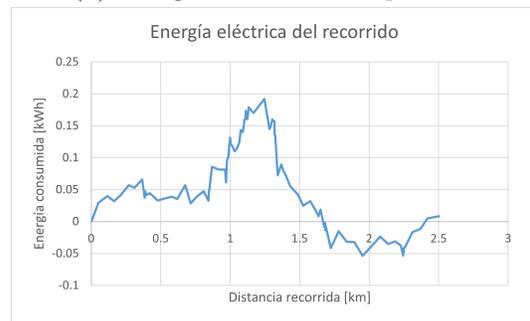
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.

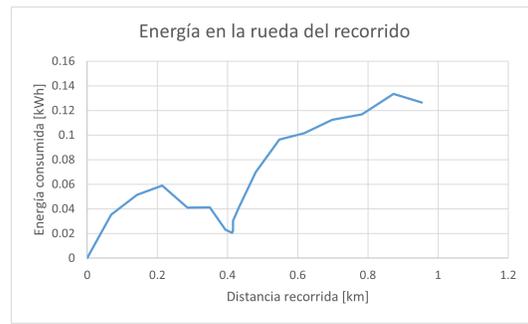


(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.1: Energías para recorrido extra TC1 del trayecto corto.



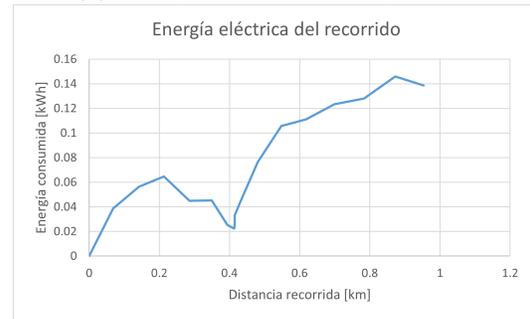
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.2: Energías para recorrido extra TC2 del trayecto corto.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.3: Energías para recorrido extra TM1 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

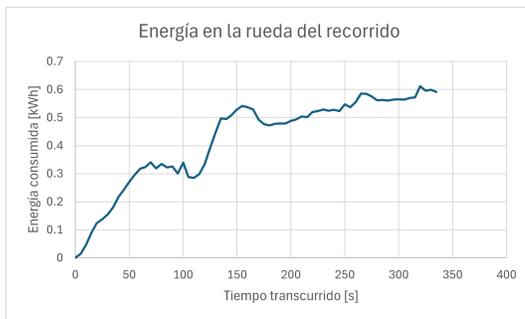


(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.4: Energías para recorrido extra TM2 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.5: Energías para recorrido extra TM3 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.

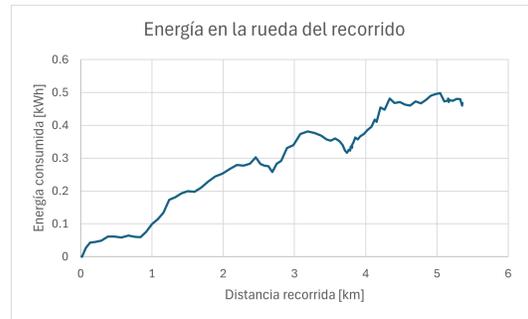


(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.6: Energías para recorrido extra TM4 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

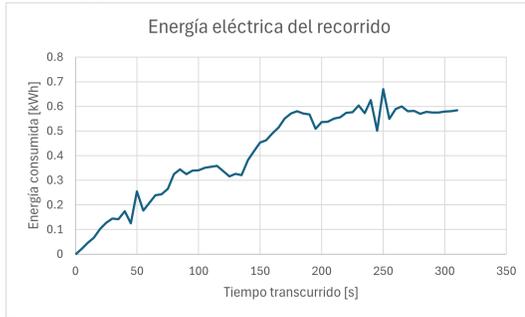
Figura D.7: Energías para recorrido extra TM5 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

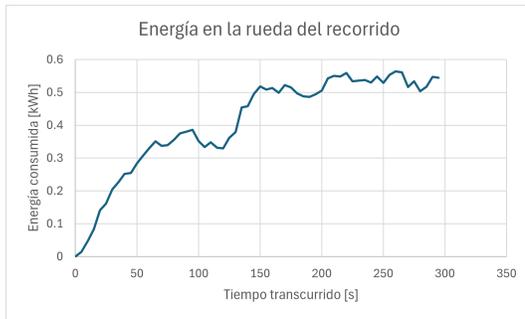


(c) Energía eléctrica vs tiempo.

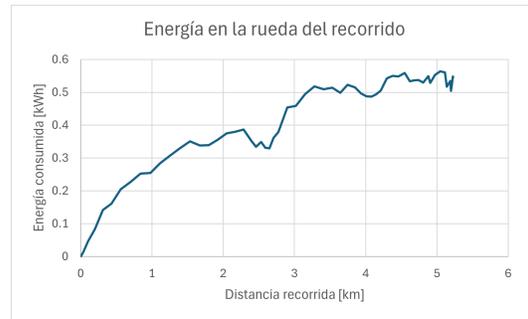


(d) Energía eléctrica vs posición.

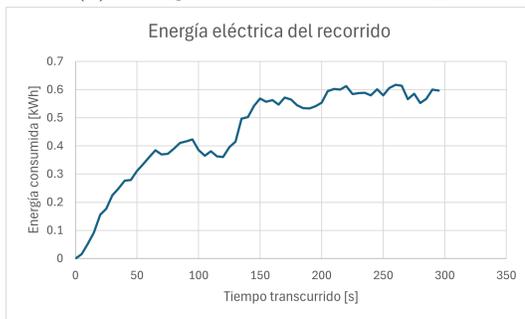
Figura D.8: Energías para recorrido extra TM6 del trayecto mediano.



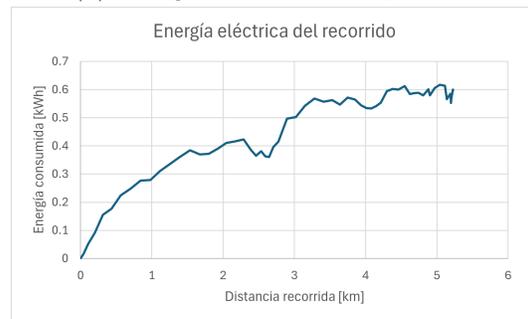
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

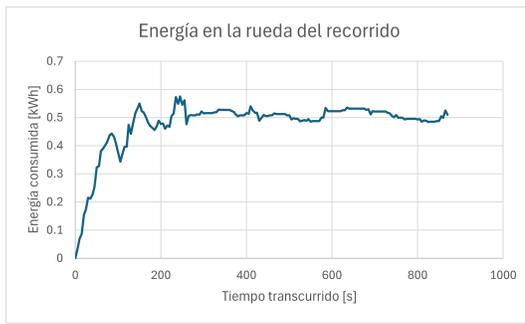


(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.9: Energías para recorrido extra TM7 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.

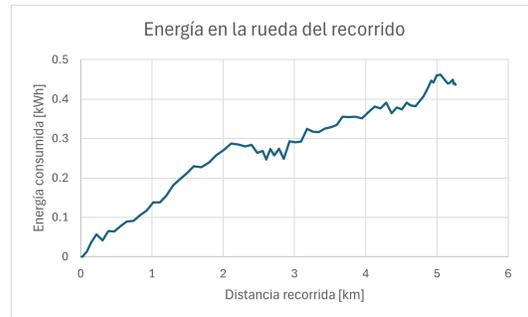


(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.10: Energías para recorrido extra TM8 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

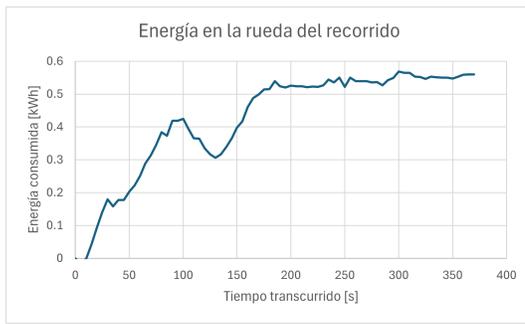


(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

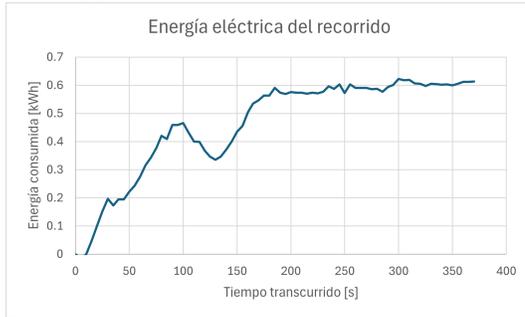
Figura D.11: Energías para recorrido extra TM9 del trayecto mediano.



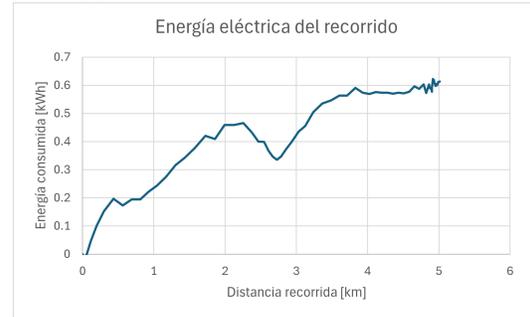
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

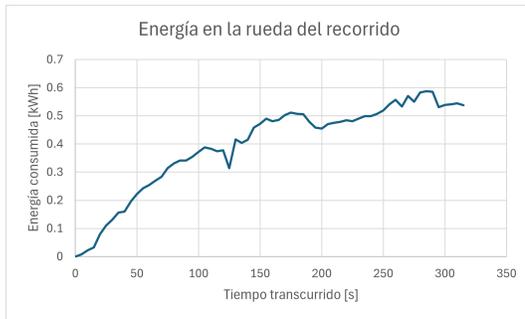


(c) Energía eléctrica vs tiempo.

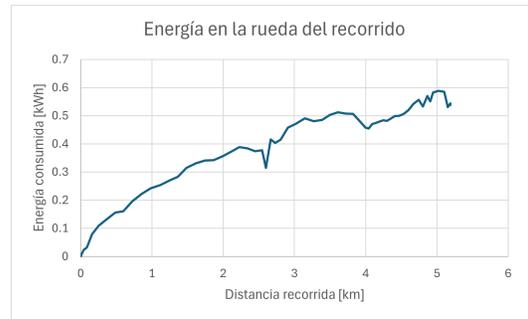


(d) Energía eléctrica vs posición.

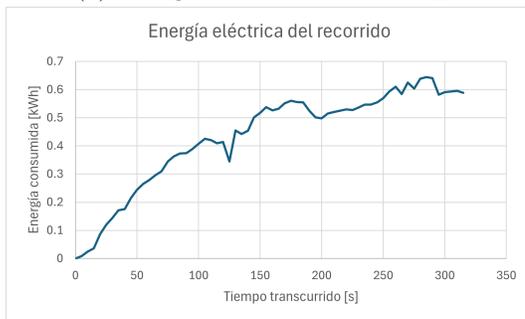
Figura D.12: Energías para recorrido extra TM10 del trayecto mediano.



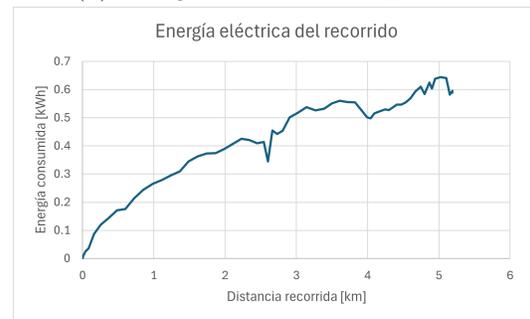
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

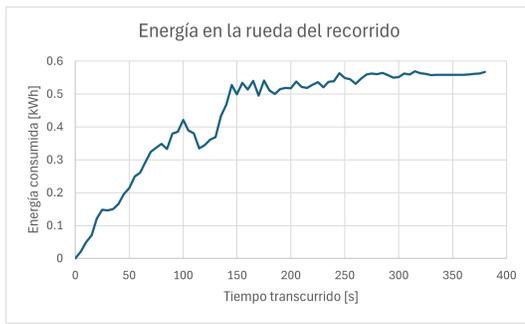


(c) Energía eléctrica vs tiempo.

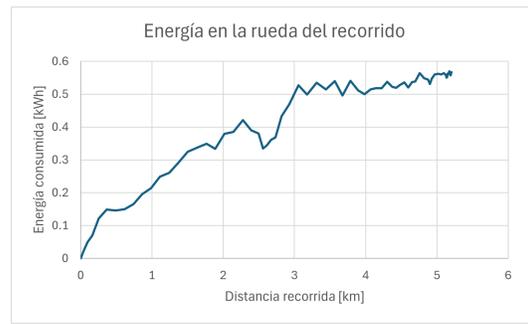


(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.13: Energías para recorrido extra TM11 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.14: Energías para recorrido extra TM12 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.

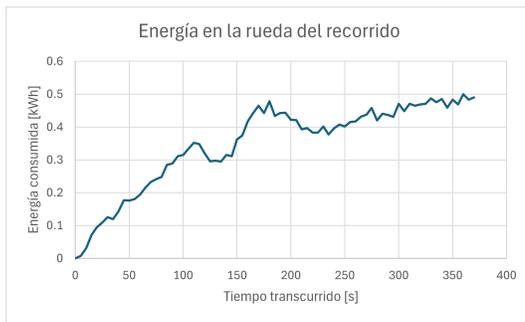


(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.15: Energías para recorrido extra TM13 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.16: Energías para recorrido extra TM14 del trayecto mediano.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.17: Energías para recorrido extra TL1 del trayecto largo.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.18: Energías para recorrido extra TL2 del trayecto largo.



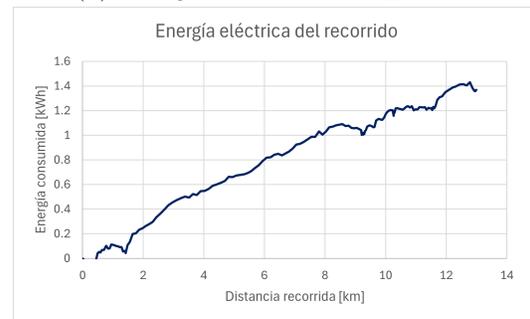
(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

Figura D.19: Energías para recorrido extra TL3 del trayecto largo.



(a) Energía en la rueda vs tiempo.



(b) Energía en la rueda vs posición.



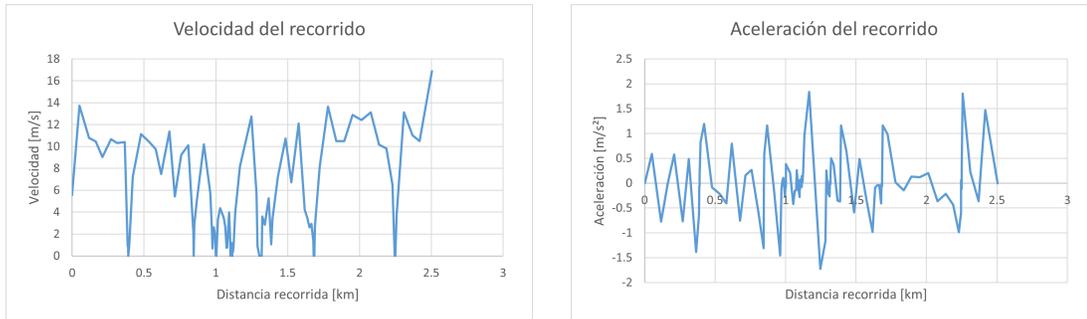
(c) Energía eléctrica vs tiempo.



(d) Energía eléctrica vs posición.

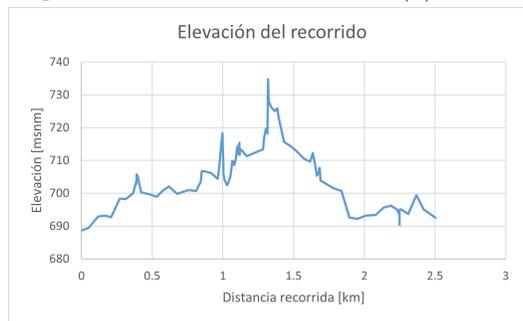
Figura D.20: Energías para recorrido extra TL4 del trayecto largo.

Anexo E. Velocidad, aceleración y elevación de recorridos no analizados para los trayectos corto, mediano y largo



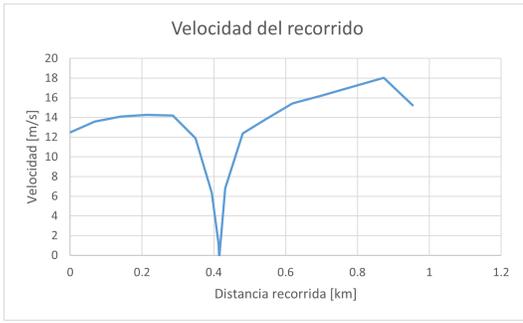
(a) Velocidad vs posición.

(b) Aceleración vs posición.

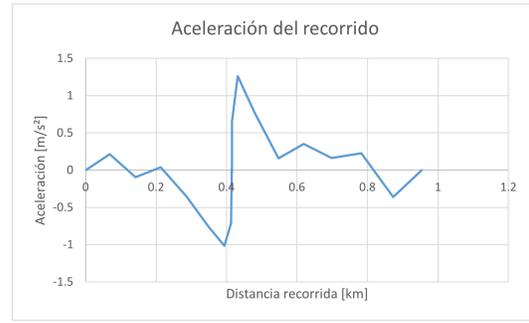


(c) Elevación vs posición.

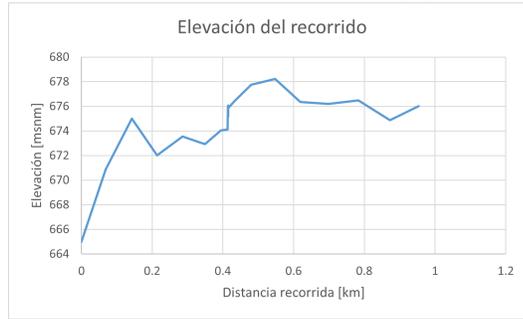
Figura E.1: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TC1 del trayecto corto.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

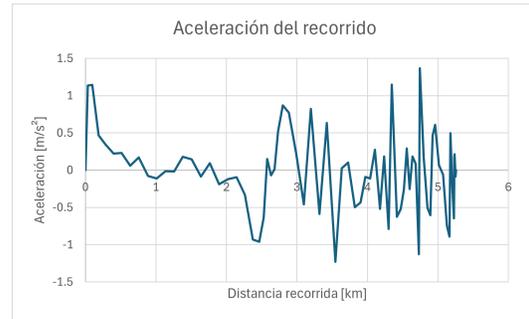


(c) Elevación vs posición.

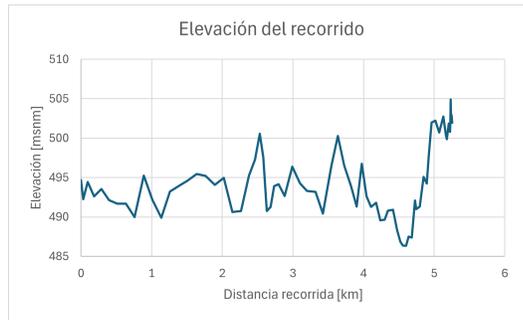
Figura E.2: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TC2 del trayecto corto.



(a) Velocidad vs posición.

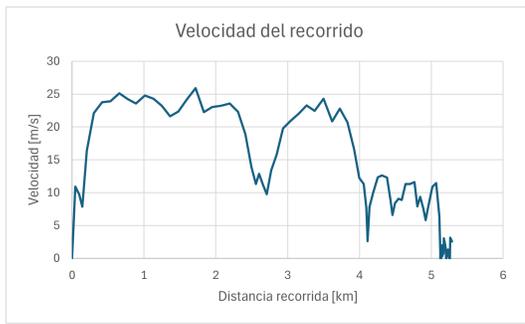


(b) Aceleración vs posición.

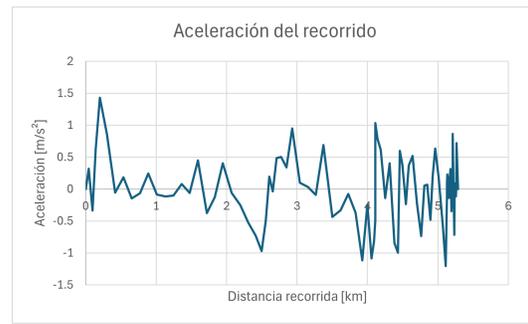


(c) Elevación vs posición.

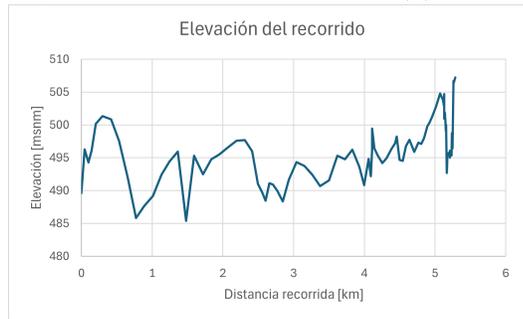
Figura E.3: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM1 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

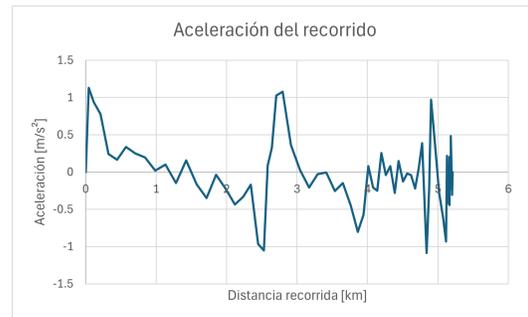


(c) Elevación vs posición.

Figura E.4: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM2 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

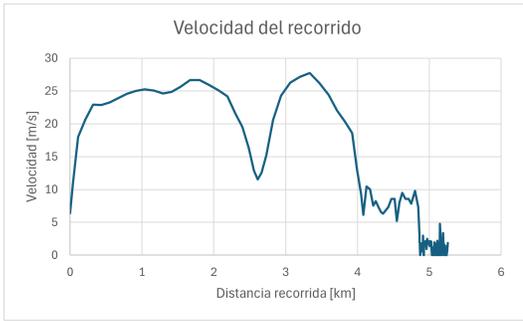


(b) Aceleración vs posición.

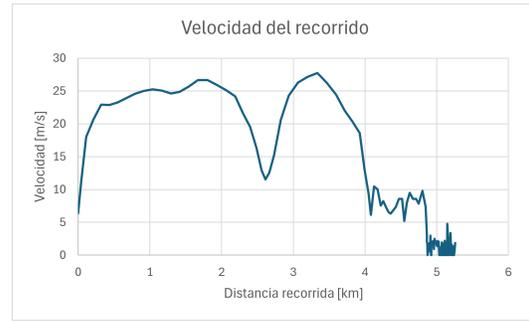


(c) Elevación vs posición.

Figura E.5: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM3 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

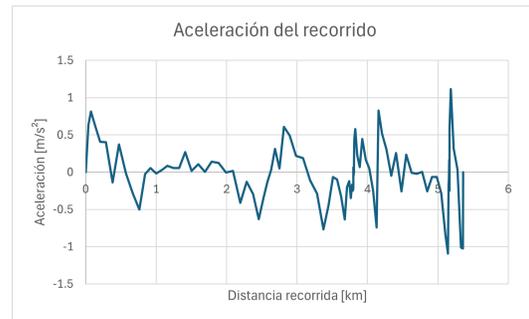


(c) Elevación vs posición.

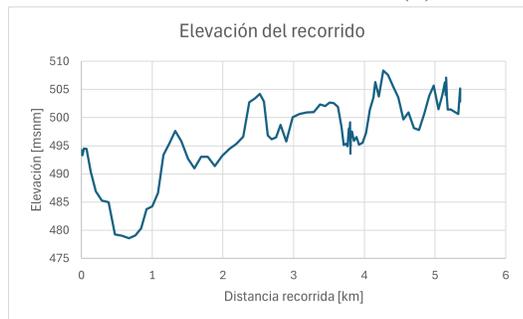
Figura E.6: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM4 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

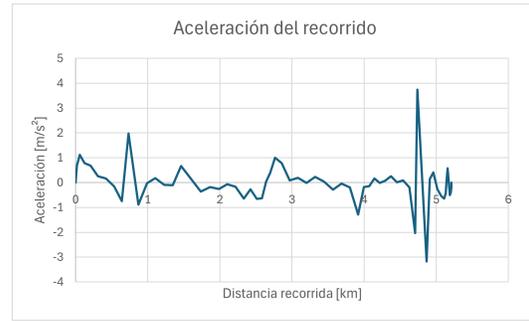


(c) Elevación vs posición.

Figura E.7: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM5 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

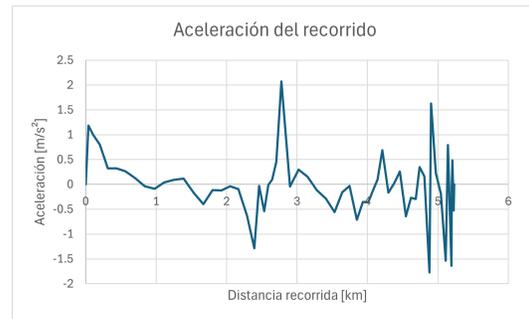


(c) Elevación vs posición.

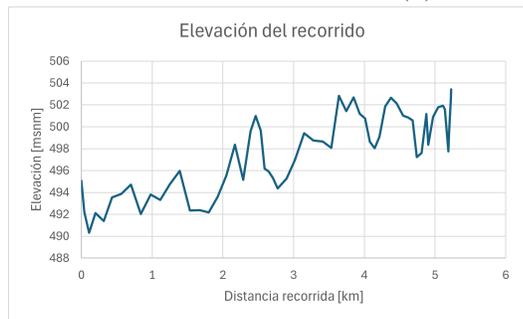
Figura E.8: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM6 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

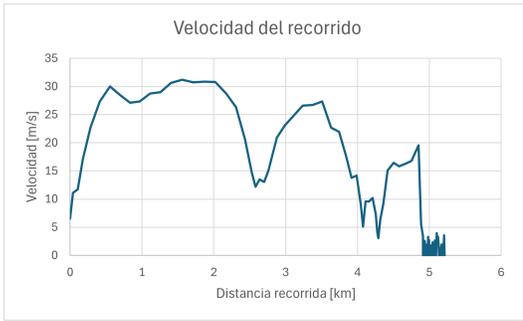


(b) Aceleración vs posición.

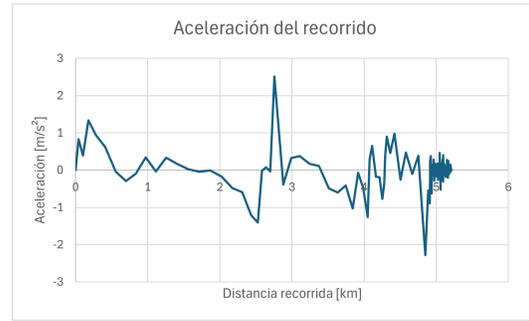


(c) Elevación vs posición.

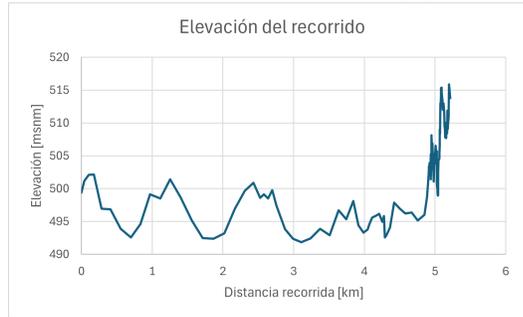
Figura E.9: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM7 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

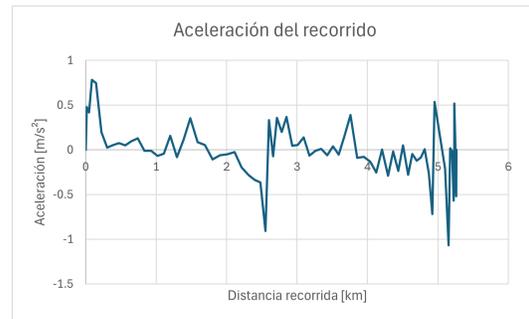


(c) Elevación vs posición.

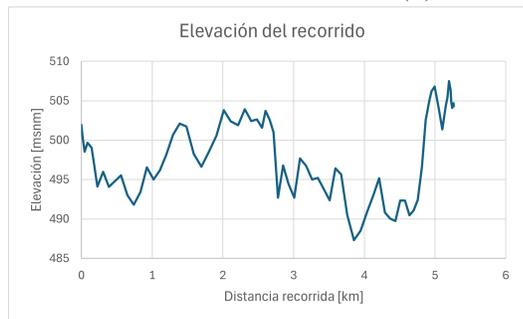
Figura E.10: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM8 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

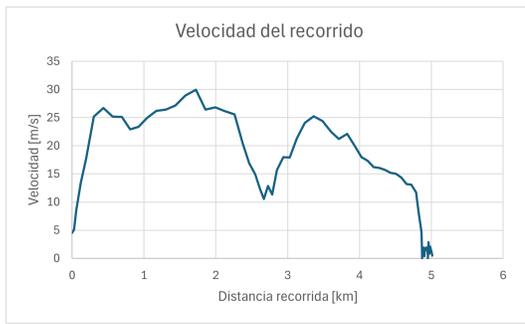


(b) Aceleración vs posición.

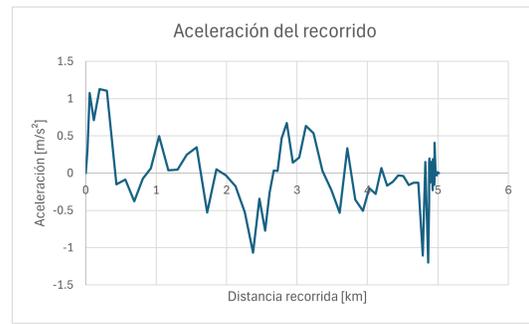


(c) Elevación vs posición.

Figura E.11: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM9 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

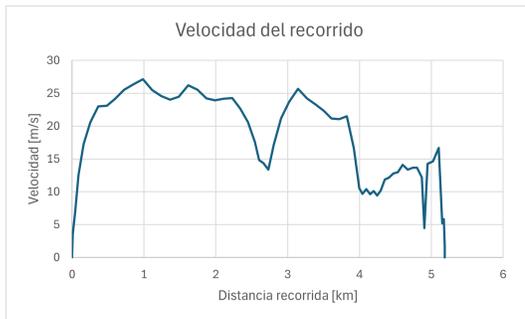


(b) Aceleración vs posición.

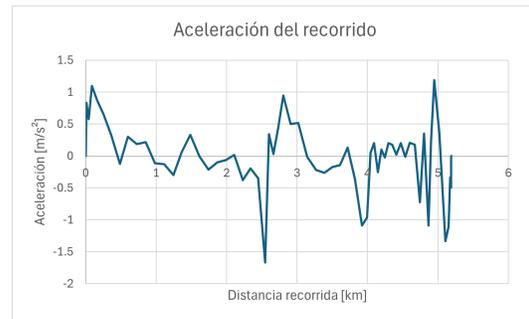


(c) Elevación vs posición.

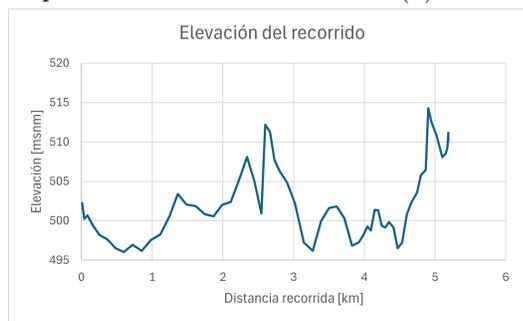
Figura E.12: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM10 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

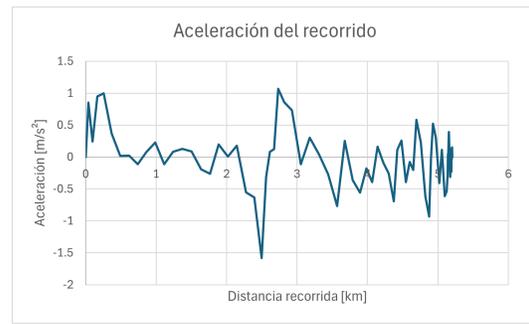


(c) Elevación vs posición.

Figura E.13: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM11 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

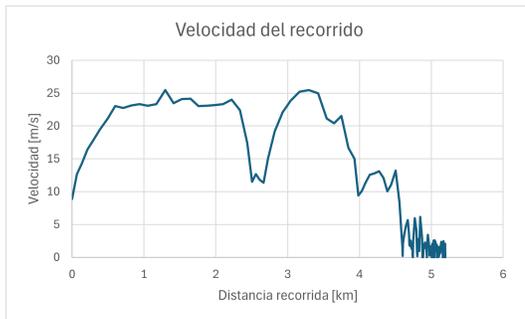


(b) Aceleración vs posición.

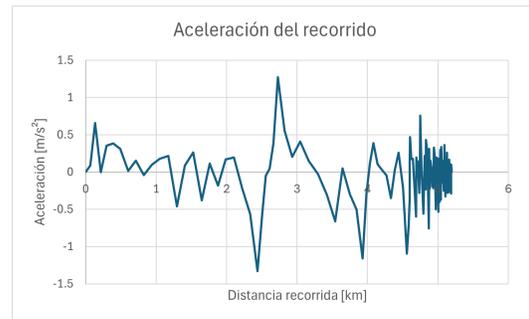


(c) Elevación vs posición.

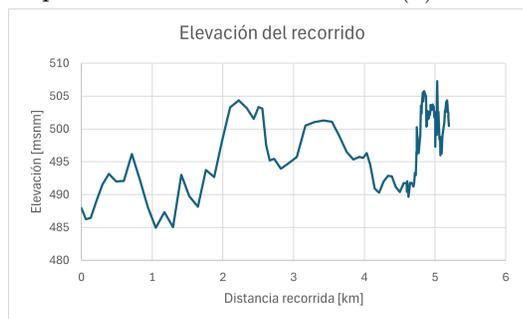
Figura E.14: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM12 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

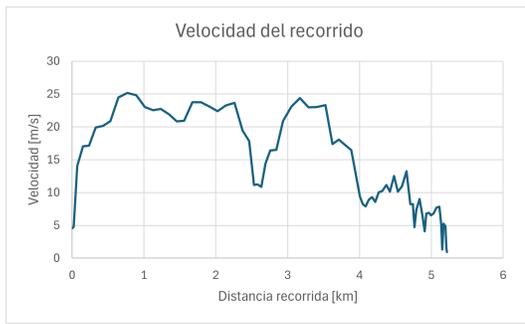


(b) Aceleración vs posición.



(c) Elevación vs posición.

Figura E.15: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM13 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

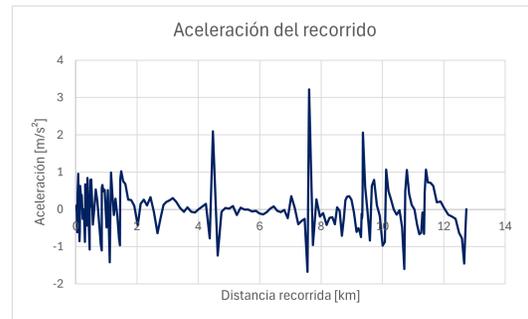


(c) Elevación vs posición.

Figura E.16: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TM14 del trayecto mediano.



(a) Velocidad vs posición.

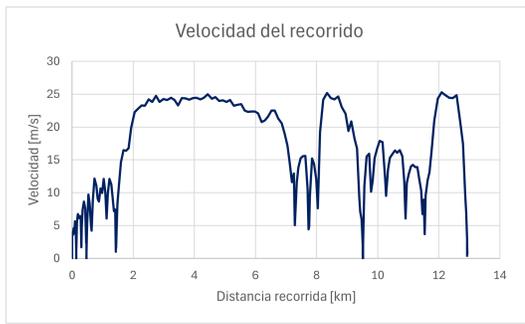


(b) Aceleración vs posición.

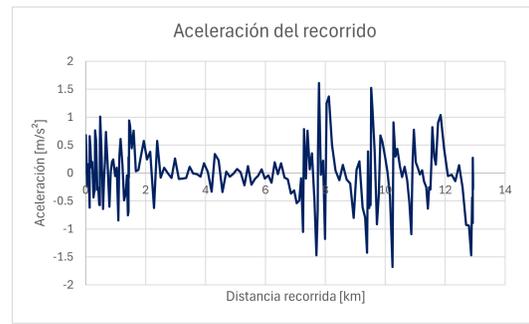


(c) Elevación vs posición.

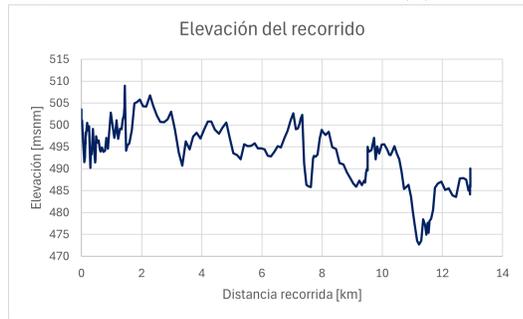
Figura E.17: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL1 del trayecto largo.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.

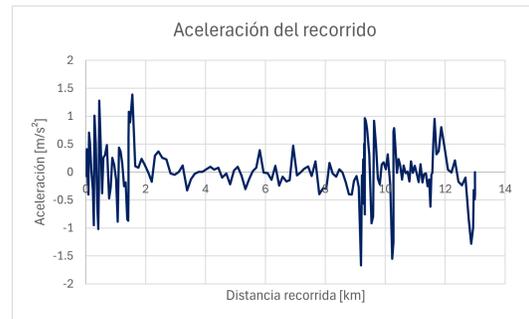


(c) Elevación vs posición.

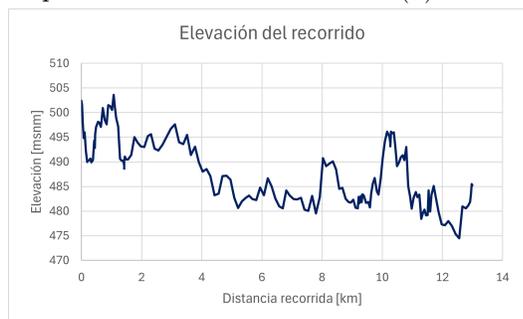
Figura E.18: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL2 del trayecto largo.



(a) Velocidad vs posición.

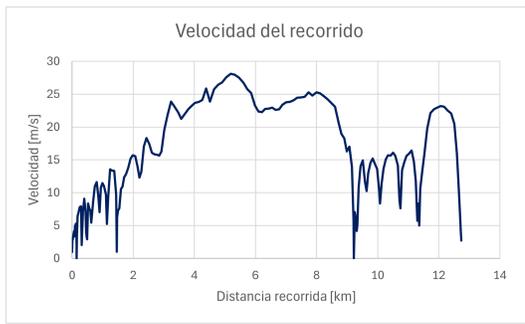


(b) Aceleración vs posición.

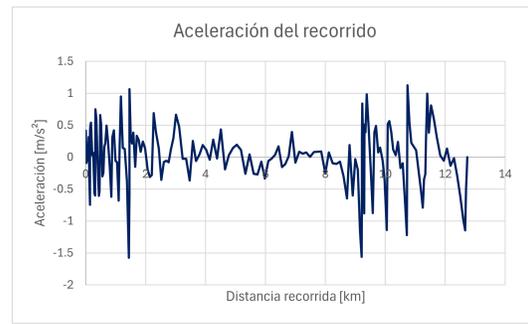


(c) Elevación vs posición.

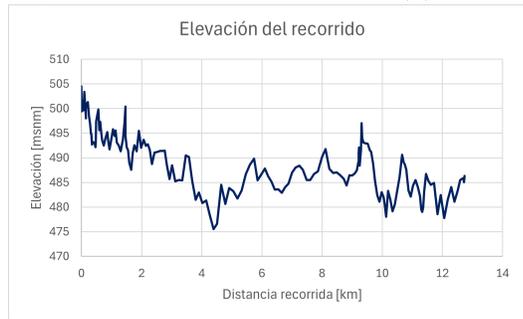
Figura E.19: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL3 del trayecto largo.



(a) Velocidad vs posición.



(b) Aceleración vs posición.



(c) Elevación vs posición.

Figura E.20: Velocidad, aceleración y elevación para recorrido extra TL4 del trayecto largo.