



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

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA AGRESIVIDAD DEL PERFIL DE
CONDUCCIÓN EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ESTEBAN NICOLÁS KUZMANIC REYES

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE REYES MARAMBIO
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

SANTIAGO DE CHILE
2022

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA AGRESIVIDAD DEL PERFIL DE CONDUCCIÓN EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El presente estudio busca determinar el efecto de la agresividad del perfil de conducción en el consumo energético de vehículos eléctricos, utilizando datos reales de operación. Se entiende como vehículo eléctrico a un móvil impulsado por uno o más motores eléctricos junto a un sistema electrónico de potencia que aprovechan la capacidad de almacenamiento de las baterías. Este estudio tiene como motivación ser un aporte a la aceleración sostenible de la electromovilidad que permitirá reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y así, combatir el cambio climático.

Para cuantificar la agresividad del perfil de conducción, se utilizaron tres indicadores diferentes. El primero se llama *Ripple aggressiveness* (RA) y mide la cantidad de cambios bruscos de velocidad con respecto al total de cambios de velocidad, el segundo es el *Driver aggressiveness* (DA) y es una variación del RA y el tercero es la desviación estándar (SD) de la velocidad, se considera un recorrido totalmente calmado cuando la SD es nula.

La metodología empleada consistió en tres etapas: Preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento de datos. En el preprocesamiento de datos se determinaron los recorridos a analizar. Luego, en el procesamiento de datos se cuantificó la agresividad del recorrido con los tres indicadores mencionados, el consumo energético y los kilómetros recorridos. La agresividad y el consumo se realizaron utilizando *Python Spyder*, mientras que la distancia recorrida se calculó con *GPS visualizer* y *Google earth*. En el postprocesamiento de datos se obtuvieron los resultados. Estos se generaron desde lo general a lo particular, comenzando con gráficos de dispersión que muestran cómo se distribuye la agresividad con respecto al rendimiento. En segundo lugar, se estudia la agresividad según distintas características del viaje (horario, distancia y velocidad media). Luego, se comparan los recorridos más agresivos con los menos agresivos, se comparan recorridos con rutas similares y con agresividades similares.

De los resultados se concluye que, al estudiar los recorridos similares existe una tendencia de que a mayor agresividad peor será el rendimiento, por lo que hay una relación negativa entre agresividad y rendimiento. Cuando se estudian todos los recorridos de forma general, no se observa relación entre agresividad y rendimiento, pero se destaca que todos los recorridos muestran agresividades bajas y son del nivel calmado o normal. Otra conclusión importante es que, en el caso de los buses, un factor determinante para el rendimiento es el horario del recorrido, el cual se asocia al nivel de tráfico en las calles. Para los taxis no se encuentra un factor único que domine el rendimiento que tendrá un recorrido, por lo que se concluye la dificultad de analizar factores que afecten el rendimiento de forma aislada al trabajar con datos reales de operación.

*Al tata,
Que ahora podré ser su ayudante.*

Agradecimientos

En primer lugar, y el agradecimiento más importante, es a mi familia por su apoyo incondicional, por siempre estar ahí, por su cariño, simplemente por todo. En especial quiero agradecer a mi papá y mi mamá que son lo máximo y gracias a ellos he podido lograr las cosas que me he propuesto, les debo la vida y mucho más. También quiero agradecer a mis hermanos que tengo la suerte de tener de amigos y me han acompañado y ayudado en todo, incluyendo este trabajo. Agradecer a la Angie, al tata y a toda mi familia por su cariño constante.

En segundo lugar agradecer a mis amigos, de la u, el colegio y la vida, por apañarme siempre, y hacer de mis años en la u increíblemente buenos, gratos y entretenidos. Agradecer, especialmente, a los que me siguieron bancando en las malas, porque se vienen las buenas.

En tercer lugar, agradecer a los docentes y funcionarios de la Universidad, especialmente a los del departamento de mecánica, quienes realizan un tremendo trabajo y hacen que el departamento tenga un excelente ambiente. Agradecer especialmente a Williams y Jorge por su ayuda y sus consejos para poder realizar este trabajo.

Finalmente, pero no por eso menos importante, quiero agradecerme a mí, por creer en mí, por trabajar duro y lograr llegar hasta acá.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación y contexto | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.2.1. Objetivo general | 3 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 3 |
| 1.3. Alcances | 3 |
| 2. Antecedentes | 4 |
| 2.1. Consumo energético sector transporte | 4 |
| 2.2. Electromovilidad | 5 |
| 2.2.1. Características principales | 6 |
| 2.2.2. Almacenamiento y carga | 7 |
| 2.2.3. Vehículos a estudiar | 9 |
| 2.3. Agresividad | 11 |
| 2.3.1. Procesamiento de datos | 13 |
| 2.4. Estudio del arte | 15 |
| 3. Metodología | 17 |
| 3.1. Pre-procesamiento de datos | 17 |
| 3.2. Procesamiento de datos | 18 |
| 3.2.1. Cuantificación agresividad | 18 |
| 3.2.2. Cuantificación consumo energético | 20 |
| 3.2.3. Cuantificación distancia recorrida | 20 |
| 3.3. Post-procesamiento de datos | 22 |
| 3.3.1. Gráficos de dispersión | 22 |
| 3.3.2. Máximos y mínimos | 23 |
| 3.3.3. Agresividad según características del viaje | 23 |
| 3.3.4. Recorridos similares | 24 |
| 3.3.5. Agresividades similares | 24 |
| 4. Resultados | 26 |
| 4.1. Dispersión entre agresividad y consumo energético | 26 |
| 4.1.1. Taxis | 26 |
| 4.1.2. Buses | 28 |
| 4.2. Estudio de máximos y mínimos | 30 |
| 4.2.1. Taxis | 31 |
| 4.2.2. Buses | 32 |
| 4.3. Agresividad según características del viaje | 34 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.3.1. | Según horario | 34 |
| 4.3.2. | Según distancia | 36 |
| 4.3.3. | Según velocidad media | 37 |
| 4.4. | Recorridos similares | 39 |
| 4.4.1. | Grupo 1 | 39 |
| 4.4.2. | Grupo 2 | 41 |
| 4.4.3. | Grupo 3 | 41 |
| 4.5. | Agresividades similares | 42 |
| 4.5.1. | Grupo 4 | 42 |
| 4.5.2. | Grupo 5 | 43 |
| 4.5.3. | Grupo 6 | 44 |
| 4.5.4. | Grupo 7 | 45 |
| 5. | Análisis y Discusión | 46 |
| 6. | Conclusiones | 52 |
| 6.1. | Recomendaciones y trabajo futuro | 53 |
| | Bibliografía | 54 |
| | Anexos | 56 |
| A. | Ficha técnica Hyundai ioniq | 56 |
| B. | Infografía Bus BYD K9 FE | 65 |
| C. | Código para cuantificación de agresividad y consumo energético | 66 |
| D. | Frecuencia óptima de muestreo de datos | 70 |

Índice de Tablas

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Tipos de sistemas de almacenamiento | 8 |
| 2.2. | Tiempos de carga según capacidad de baterías y potencia disponible [10] | 9 |
| 2.3. | Características técnicas vehículos de estudio | 10 |
| 3.1. | Categorías de SOC inicial | 20 |
| 3.2. | Criterio para categorización de características de cada viaje | 23 |
| 3.3. | Grupos de recorridos similares estudiados | 24 |
| 3.4. | Grupos de agresividades similares estudiadas | 25 |
| 4.1. | Comparación Taxis vs Buses | 26 |
| 4.2. | Características máximos y mínimos: Taxis | 31 |
| 4.3. | Características máximos y mínimos: Buses | 32 |
| 4.4. | Características principales: Grupo 1 | 39 |
| 4.5. | Características principales: Grupo 2 | 41 |
| 4.6. | Características principales: Grupo 3 | 42 |
| 4.7. | Características principales: Grupo 4 | 43 |
| 4.8. | Características principales: Grupo 5 | 44 |
| 4.9. | Características principales: Grupo 6 | 45 |
| 4.10. | Características principales: Grupo 7 | 45 |
| D.1. | Frecuencias de muestreo según velocidad alcanzada | 71 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1. | Situación actual (izquierda) y proyección (derecha) de vehículos eléctricos a nivel mundial [3] | 2 |
| 1.2. | Venta de vehículos [4] | 2 |
| 2.1. | Balance Nacional de Energía 2018 [8] | 5 |
| 2.2. | Partes de un vehículo eléctrico [11] | 7 |
| 2.3. | Comparación tipos de baterías | 8 |
| 2.4. | Vehículos a estudiar: (a) Bus eléctrico BYD k9. (b) taxi eléctrico hyundai ioniq | 10 |
| 2.5. | Resultados Ruta Sustentable: Taxis | 11 |
| 2.6. | Resultados Ruta Sustentable: Buses | 11 |
| 2.7. | Espectros de Fourier de: (a) Espectro de Fourier de la velocidad, (b) Espectro de Fourier de la aceleración y (c) Espectro de Fourier del jerk | 14 |
| 2.8. | Inconsistencia encontrada en el Ripple Aggressiveness | 15 |
| 3.1. | Velocidad, aceleración y jerk en el tiempo del recorrido n°9 de taxis | 18 |
| 3.2. | Periodograma del recorrido n°9 de taxis. Velocidad vs frecuencia | 19 |
| 3.3. | Periodograma del recorrido n°9. Jerk vs frecuencia | 19 |
| 3.4. | Visualización de recorridos | 21 |
| 4.1. | Relación entre agresividad y rendimiento basado en consumo energético: Taxi . | 27 |
| 4.2. | Relación entre agresividad y rendimiento basado en SOC: Taxi | 28 |
| 4.3. | Relación entre agresividad y rendimiento basado en consumo energético: Bus . | 29 |
| 4.4. | Relación entre agresividad y rendimiento basado en SOC: Bus | 30 |
| 4.5. | Velocidad vs tiempo: máximos y mínimos (Taxis) | 31 |
| 4.6. | Aceleración vs tiempo: máximos y mínimos (Taxis) | 31 |
| 4.7. | Periodogramas de velocidad: máximos y mínimos (Taxis) | 32 |
| 4.8. | Periodogramas de jerk: máximos y mínimos (Taxis) | 32 |
| 4.9. | Velocidad vs tiempo: máximos y mínimos (Buses) | 33 |
| 4.10. | Aceleración vs tiempo: máximos y mínimos (Buses) | 33 |
| 4.11. | Periodogramas de velocidad: máximos y mínimos (Buses) | 33 |
| 4.12. | Periodogramas de jerk: máximos y mínimos (Buses) | 34 |
| 4.13. | Agresividad según horario: Taxi | 35 |
| 4.14. | Agresividad según horario: Bus | 35 |
| 4.15. | Agresividad según distancia: Taxi | 36 |
| 4.16. | Agresividad según distancia: Bus | 37 |
| 4.17. | Agresividad según velocidad media: Taxi | 38 |
| 4.18. | Agresividad según velocidad media: Bus | 38 |
| 4.19. | Mapa de los recorridos del grupo 1 | 39 |
| 4.20. | Velocidad vs tiempo: Grupo 1 | 40 |
| 4.21. | Aceleración vs tiempo: Grupo 1 | 40 |
| 4.22. | Periodograma de velocidad: Grupo 1 | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.23. | Periodograma de jerk: Grupo 1 | 40 |
| 4.24. | Mapa de los recorridos: Grupo 2 | 41 |
| 4.25. | Mapeo de los recorridos: Grupo 3 | 41 |
| 4.26. | Mapeo de los recorridos: Grupo 4 | 42 |
| 4.27. | Mapeo de los recorridos: Grupo 5 | 43 |
| 4.28. | Mapeo de los recorridos: Grupo 6 | 44 |
| D.1. | Recorrido ideal (a) y recorrido agresivo (b) | 70 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y contexto

El presente estudio tiene como motivación dos pilares principales relacionados entre ellos. En primer lugar, está la urgencia que la crisis climática impone a las personas y sociedades en la actualidad de cambiar lo antes posible ciertas formas y comportamientos humanos que son nocivas para el medio ambiente, entre estas, se destaca el transporte. Como segundo pilar, se tiene como motivación el gran aumento del parque vehicular eléctrico, tanto a nivel mundial como nacional. Esta electrificación del transporte es un impulso y un primer paso para la lucha contra el cambio climático, pero a la vez supone un gran desafío en lo que respecta a la correcta transición tecnológica. Por lo tanto, se hace necesario comprender el funcionamiento y comportamiento de los vehículos eléctricos para que la transición tecnológica, que ayudará a combatir el cambio climático, se aborde de buena forma.

El informe generado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, presentado en agosto de 2021, revela que el calentamiento global no tiene precedentes en cientos de miles de años y sus consecuencias no podrán ser revertidas en siglos o incluso milenios. Dentro de las principales consecuencias de esta crisis global se encuentran: aumento de temperaturas, intensificación del ciclo hidrológico, aumento continuo del nivel del mar, acidificación del océano, entre otros. Además, se presenta como indiscutible la responsabilidad humana en este cambio climático. Sin embargo, una reducción sustancial y sostenida de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) permitirían limitar el cambio climático con mejoras rápidas de la calidad de aire y estabilización de temperaturas en 20 o 30 años [1]. Con el fin de reducir las emisiones de GEI el sector transporte juega un rol fundamental ya que este sector aporta un 25,5% de las emisiones de GEI generadas, y este porcentaje ha estado en constante crecimiento en los últimos años [2].

Los vehículos eléctricos (VE) se presentan como uno de los principales sustitutos ecológicos de los vehículos tradicionales de combustión, ya que al funcionar mediante un motor eléctrico no generan emisiones directas de gases de efecto invernadero, a su vez, si la matriz de generación eléctrica posee cada vez más participación de energías renovables, menor será el impacto ambiental de estos vehículos. A nivel mundial, se ve un aumento exponencial en el uso y ventas de vehículos eléctricos, tal como se puede ver en la figura 1.1. En esta imagen se ve la situación global hasta el 2020 y como ha sido proyectada en caso de que se impulsen políticas que incentiven el uso de vehículos eléctricos. En ambos casos, se ve como los

vehículos eléctricos son una tecnología que ha entrado con fuerza y lo seguirá haciendo en los próximos años por lo que es necesario conocer de forma completa su comportamiento para que la transición tecnológica se realice de forma acelerada pero sostenible.

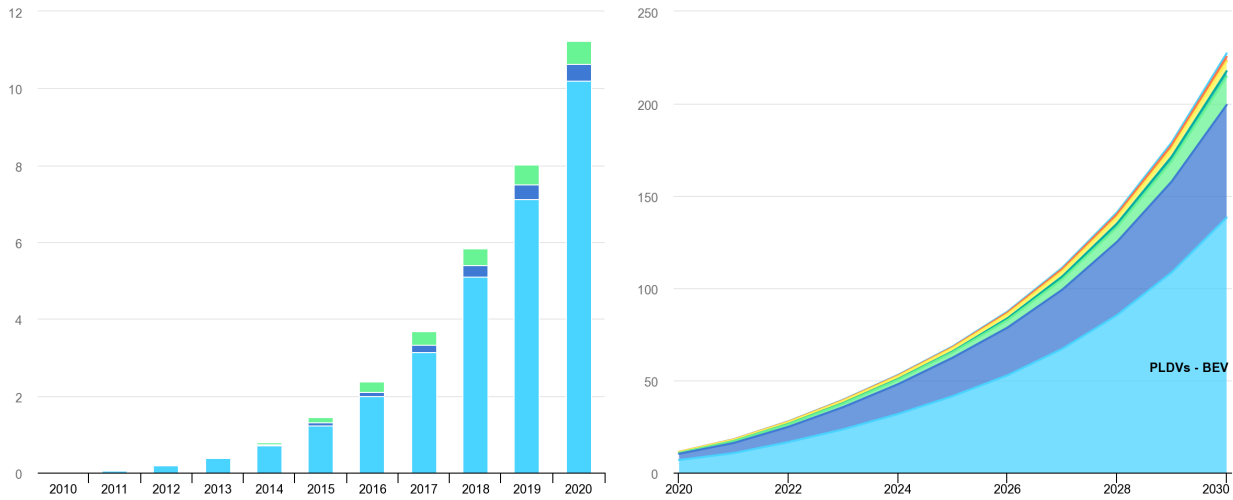


Figura 1.1: Situación actual (izquierda) y proyección (derecha) de vehículos eléctricos a nivel mundial [3]

En Chile, La venta de vehículos eléctricos ha aumentado considerablemente en los últimos años, como se puede ver en la figura 1.2, lo que es una buena noticia e indicio de que se ha comenzado a modificar el transporte por uno más eficiente energéticamente y limpio. El aumento exponencial que se ha visto en la venta anual de vehículos eléctricos (con excepción del 2020), impulsa a aumentar los estudios sobre estos vehículos para así aumentar los conocimientos sobre estos y poder operarlos de forma óptima.

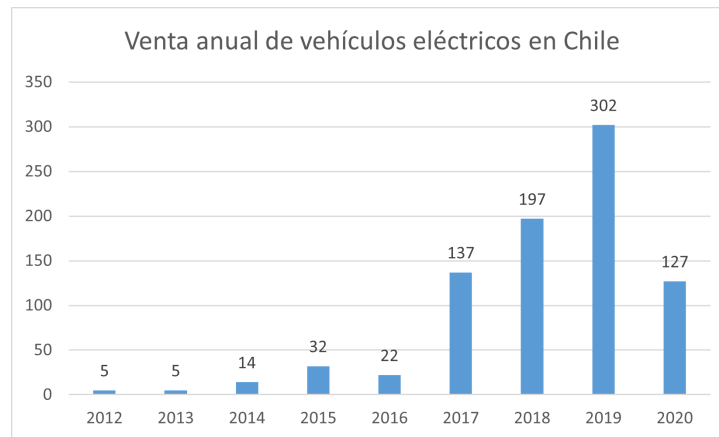


Figura 1.2: Venta de vehículos [4]

El presente trabajo de investigación busca ser un aporte en la transición energética del transporte en Chile, permitiendo profundizar los conocimientos que se tienen sobre los vehículos eléctricos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Como objetivo general se propone determinar el efecto de la agresividad del perfil de conducción en el consumo energético de vehículos eléctricos.

1.2.2. Objetivos específicos

Con el fin de cumplir con el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar y analizar los perfiles de conducción y agresividad, en base a datos reales de operación de un bus y un taxi eléctrico.
- Analizar la relación entre la agresividad del perfil de conducción con la eficiencia energética de un bus y un taxi eléctrico operativos en Santiago.
- Relacionar los recorridos realizados por los vehículos con la agresividad presentada y el consumo energético de cada vehículo.
- Comparar el efecto de la agresividad del conductor según tipo de vehículo.
- Identificar condiciones de conducción que permitan maximizar la eficiencia energética.

1.3. Alcances

Como alcance del presente trabajo de investigación se debe mencionar que los datos que se utilizarán son datos reales de operación tomados con una frecuencia de 1 minuto para el bus y 5 a 8 segundos para el taxi. Además, se estudiaron 115 recorridos de buses y 89 recorridos de taxis. La agresividad fue cuantificada con tres parámetros distintos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Consumo energético sector transporte

El sector transporte es uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial. El año 2019 representó el 31,9 % del consumo de energía en el mundo, y prácticamente la totalidad de este consumo fue a partir de derivados del petróleo, siendo este un 92,2 % [5].

En el caso de Chile la situación es similar. De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2019, el sector transporte representa un 36,6 % del consumo energético final, siendo el segundo sector que más energía consumió el año 2019, solamente superado por la industria y minería (38 % de consumo total del país). El consumo energético del sector transporte corresponde casi totalmente a derivados del petróleo (99 %) [6]. Es por esto que es responsable de un porcentaje importante de las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente un 25,5 % del total de emisiones generadas [7].

Las emisiones de GEI el 2018 en el sector transporte en Chile fueron de 28.615 kt CO₂eq, esto significó un incremento de 8,4 % con respecto al 2016 y un 214,5 % con respecto a 1990 [7]. Esto se debe principalmente al crecimiento del parque automotor que ha aumentado dado el mayor poder adquisitivo y el mejoramiento de la infraestructura vial en el país [2].

La figura 2.1 muestra el balance nacional de energía del año 2018 mediante un diagrama Sankey, en esta se puede observar la fuente primaria de energía y su uso final. Se destaca que hasta el año 2018, la mayoría de la energía provenía de combustibles fósiles y solo una pequeña fracción provenía de fuentes renovables como la energía solar o la energía eólica. Además, se puede observar que el sector transporte es uno de los sectores que más energía consume superado solo por el sector industrial.

Todas las unidades están en TCal.

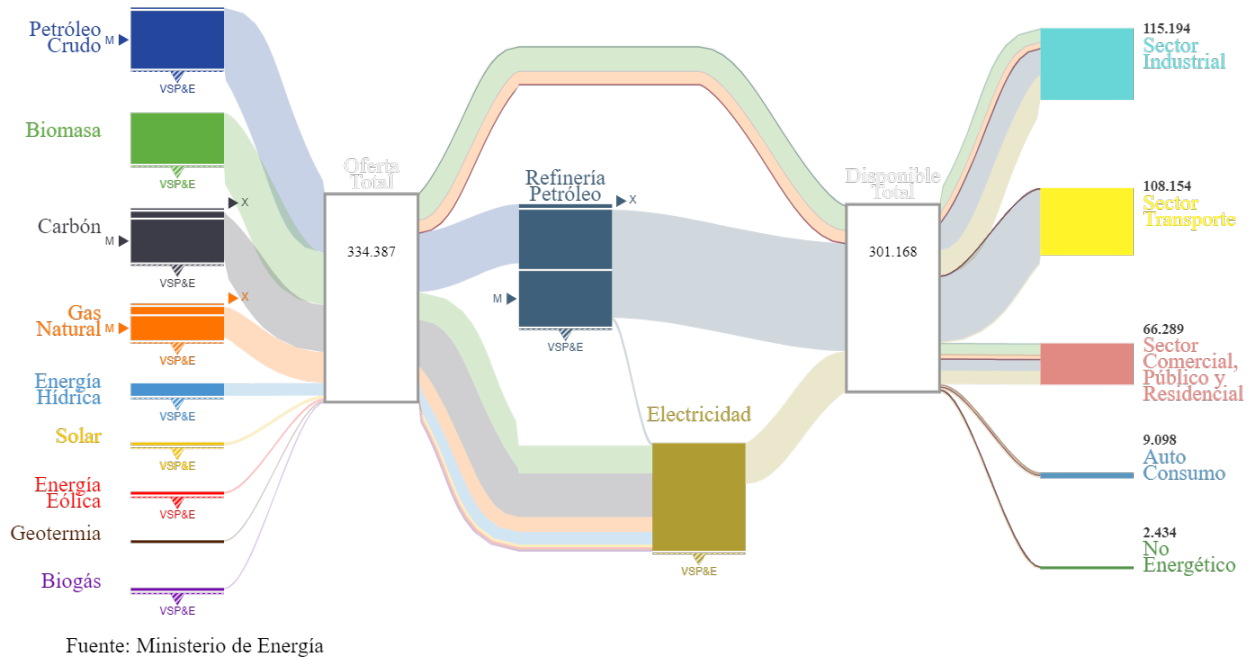


Figura 2.1: Balance Nacional de Energía 2018 [8]

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. Un vehículo eléctrico (VE) es un móvil impulsado por uno o más motores eléctricos junto a un sistema electrónico de potencia, los que aprovechan la capacidad de almacenamiento de baterías. Actualmente las baterías de ion-litio son las que mejor han respondido a los requerimientos de los VE. La electromovilidad se presenta como una alternativa efectiva y sustentable para reducir las externalidades negativas del transporte, además puede ser económicamente competitiva. Entre sus ventajas se encuentra que [9]:

- Son vehículos con cero emisión por lo que mejoran la calidad del aire de las ciudades. Esto resulta particularmente relevante en el caso chileno, donde múltiples ciudades se han declarado como zonas saturadas de material particulado, siendo el transporte uno de los principales factores, los VE se presentan como una solución a esto.
- Al ser cero emisión, contribuye también al cambio climático ya que no emite gases de efecto invernadero. La matriz energética actual en Chile posee un 20% de participación de energías renovables, por lo que utilizar vehículos eléctricos en remplazo de los convencionales a combustión permite disminuir hasta 3 veces las emisiones de GEI.
- Los vehículos eléctricos casi no emiten ruidos, disminuyendo la contaminación acústica y permitiendo un nivel de ruido aceptable (55 dB), el cual actualmente es muy superior en múltiples puntos de acceso público.

- Los VE permiten una mejor gestión de residuos al no requerir de lubricantes ni filtros. Además, su sistema de freno sufre menos desgaste ya que se utiliza un sistema de freno regenerativo.
- Son más eficientes energéticamente que los vehículos de combustión interna. Un VE gasta 5 veces menos energía que su equivalente a combustión, principalmente ya que la eficiencia de un motor eléctrico es muy alta (sobre 95 %).
- Los VE permiten diversificar la matriz energética. Actualmente, el 98 % de la energía de transporte proviene de derivados del petróleo, al diversificar la matriz, el transporte estará menos expuesto a la volatilidad de los precios del petróleo.

Entre las principales desventajas que actualmente poseen los vehículos eléctricos se encuentra que la inversión inicial es superior a los vehículos convencionales. Además la autonomía de los VE es muy inferior a la que poseen los vehículos de combustión.

2.2.1. Características principales

Existen tres principales tipos de vehículos eléctricos: eléctricos a batería (BEV), eléctricos híbridos enchufables (PHEV) y eléctricos con celdas de combustible de hidrógeno (FCEV). En los tres casos se utiliza un motor eléctrico que proporciona movimiento al vehículo utilizando electricidad como fuente de energía, sin embargo, se diferencian en el origen de la electricidad que fluye hacia el motor [10].

1. Los BEV son 100 % eléctricos y se componen de uno o más motores alimentados por baterías, son los que tienen mayor presencia en el mercado, especialmente para transporte urbano. Son cero emisiones y se recargan desde la red eléctrica a través de cargadores DC o tomas de corriente AC. Estas últimas deben pasar por un convertidor ya que el banco de baterías funciona en corriente continua; El motor recibe electricidad de las baterías y al regenerar, entrega electricidad a las baterías.
2. Los PHEV tienen un motor térmico, uno o más motores eléctricos y un banco de baterías que alimenta a estos últimos. Tienen menor presencia en el mercado que los BEV. Si bien no son cero emisiones cuando se utiliza el motor a combustión, sirven como una tecnología de transición entre los vehículos convencionales y los 100 % eléctricos. Se pueden recargar desde la red eléctrica o recargando combustible.
3. Los FCEV son vehículos de celdas de combustible que utilizan hidrógeno, amoníaco u otro electro-combustible, para alimentar el motor. No produce emisiones y logra autonomías similares a un vehículo convencional. Se recarga con gas de hidrógeno que se almacena en estanques. El funcionamiento general consiste en que el motor recibe electricidad del pack de celdas de hidrógeno (H₂) y en caso de requerir mayor potencia se utiliza un banco de baterías similar al utilizado en los BEV, al regenerar el motor carga las baterías.

A continuación se describen las principales partes de un vehículo 100 % eléctrico alimentado por baterías, dado que estos serán los vehículos de interés en el presente estudio.

- Cargador: Transforma la corriente alterna proveniente de un punto de recarga en corriente continua.

- Banco de batería: Sistema de almacenamiento de la energía, compuesto por múltiples baterías. Se encarga de alimentar el motor eléctrico.
- Inversor: Suministra la energía desde la batería al motor (cuando es de corriente continua). Además, debido al freno regenerativo, se encarga de cargar las baterías cuando el motor actúa como generador de energía.
- Conversor: Encargado de cargar las baterías auxiliares del vehículo, las cuales se utilizan para el aire acondicionado y otros componentes eléctricos y electrónicos auxiliares.
- Motor eléctrico: Encargado de proporcionar el torque necesario para poner en movimiento al vehículo.

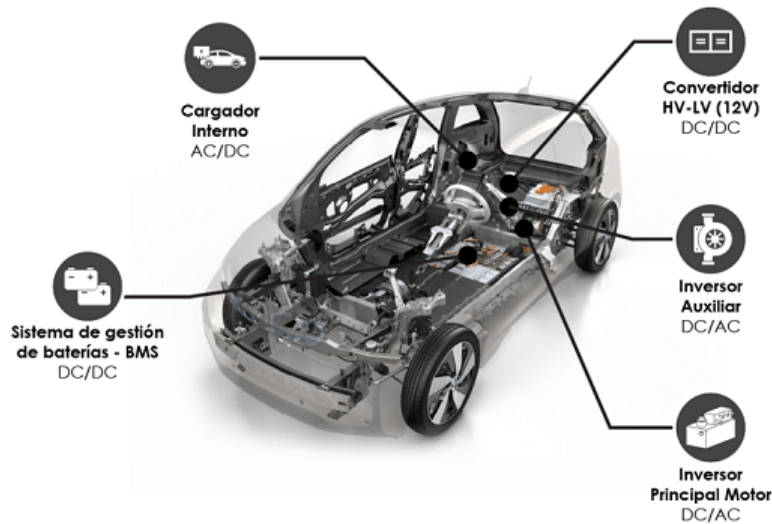


Figura 2.2: Partes de un vehículo eléctrico [11]

2.2.2. Almacenamiento y carga

De la misma forma que los vehículos convencionales acumulan la energía en estanques con gasolina o diésel, los vehículos eléctricos almacenan la energía acumulando electricidad en sistemas de almacenamiento. Existen distintas tecnologías enfocadas en el almacenamiento eléctrico y actualmente se está trabajando a nivel mundial en mejorar estos sistemas con el fin de otorgar mayor autonomía, mayor vida útil, menor relación peso versus energía almacenada y que sean capaces de recibir electricidad a alta potencia. La tabla 2.1 muestra en detalle los 3 principales tipos de sistemas de almacenamiento existentes [10].

La figura 2.3 muestra una comparación de los principales tipos de baterías utilizados. Se compara la energía específica, potencia, seguridad, rendimiento, vida útil y costos de cinco tipos diferentes de baterías.

Tabla 2.1: Tipos de sistemas de almacenamiento

| | Celdas de combustible de hidrógeno | Supercapacitores | Baterías |
|--------------------|---|---|--|
| Tipos de vehículos | <ul style="list-style-type: none"> • Vehículos livianos • Vehículos pesados (camiones y buses) | <ul style="list-style-type: none"> • Vehículos pesados (buses y tranvías urbanas) | <ul style="list-style-type: none"> • Vehículos livianos • Vehículos pesados (camiones y buses) |
| Características | <ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad de energía. • Bajo ciclo de vida. • Alto costo de mantención. | <ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad de energía. • Alta densidad de potencia (aprox. 1000000 ciclos de carga y descarga) • 10 años de vida útil. | <ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad de energía. • Baja densidad de potencia (aprox. 10000 ciclos de carga y descarga). • 10 años de vida útil. |
| Observaciones | Los sistemas a hidrógeno requieren de almacenamiento complementario como baterías o supercapacitores. | | Los principales tipos existentes son: Ión-litio, Sodio-Niquel, Hidrógeno-Niquel-Metal, Plomo-ácido. |



Figura 2.3: Comparación tipos de baterías

En el caso de los vehículos eléctricos a baterías es muy importante tener claro los diferentes modos de carga. Estos se relacionan con el tipo de comunicación entre el vehículo eléctrico y la infraestructura de recarga (y con la red eléctrica). El modo de carga influirá en el control que se puede tener del proceso, como poder programarla, revisar el estado o inyectar energía a la red. La carga se puede realizar en corriente continua o alterna, pero en el caso de corriente alterna se debe pasar por el inversor AC/DC y la capacidad de este fija el tiempo de carga mientras que en corriente continua la velocidad de carga se da por la disponibilidad de potencia. Existen cuatro principales modos de carga:

1. Modo 1: Enchufe no dedicado. La conexión es una toma de corriente alterna estándar

de una instalación existente. Debe poseer una toma a tierra, protección diferencial y protección termo magnética. Este modo de carga está limitado a 10 A y 3,5 kW. Debido a la incertidumbre de calidad y estado de la instalación eléctrica no es recomendable utilizar este modo.

2. Modo 2: Enchufe no dedicado con protección y control incorporada en el cable. Se pueden potencias de hasta 2,2 kW monofásica o 11 kW si es trifásica. Al modo 1 se le incorpora un sistema de seguridad, el cual comprueba la toma a tierra y permite seleccionar la velocidad de carga.
3. Modo 3: Enchufe dedicado. Permite potencias de hasta 3,5 kW monofásico o 44 kW trifásico. El vehículo se conecta al cargador con un control mediante un cable especial. El cargador está dotado con un control inteligente que gestiona la seguridad y proceso de carga.
4. Modo 4: Cargador externo. A diferencia de los modos anteriores, este modo funciona a corriente continua. En este modo la carga se realiza con corriente continua desde un cargador que contiene un convertidor de corriente alterna a continua. Las potencias son sobre 40 kW y alto nivel de control de carga. La carga puede ser más rápida porque el cargador tiene mayor capacidad. La velocidad de carga está determinada por la batería utilizada y su capacidad.

La tabla 2.2 muestra los tiempos de carga a partir de la potencia de los cargadores y la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías. Sin embargo, el tiempo de carga depende también de otras variables como la potencia máxima permitida y el control de temperatura de las baterías.

Tabla 2.2: Tiempos de carga según capacidad de baterías y potencia disponible [10]

| | | Potencia disponible en el cargador | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------------|--------|
| | | Corriente AC | | | | | | Corriente DC | |
| | | 2,2 kW | 3,5 kW | 7 kW | 11 kW | 22 kW | 43 kW | 50 kW | 175 kW |
| Capacidad energía en las baterías | 24 kWh | 11 h | 5,5 h | 3,5 h | 1,5 h | 50 min | 25 min | 20 min | 7 min |
| | 30 kWh | 14 h | 7 h | 3 h | 2 h | 1 h | 30 min | 30 min | 8 min |
| | 40 kWh | 18 h | 9 h | 4,5 h | 3 h | 1,5 h | 45 min | 40 min | 11 min |
| | 53 kWh | 24 h | 12 h | 6 h | 4 h | 2 h | 1 h | 50 min | 15 min |
| | 85 kWh | 39 h | 19 h | 9,5 h | 6 h | 3 h | 1,5 h | 1,3 h | 23 min |
| | 90 kWh | 41 h | 20 h | 10 h | 6,5 h | 3,5 h | 1,5 h | 1,5 h | 25 min |

2.2.3. Vehículos a estudiar

El estudio busca determinar el efecto de la agresividad del conductor en el consumo energético de los vehículos, para esto se estudiarán datos reales de operación de dos vehículos eléctricos operativos en Santiago, el primero es un bus eléctrico BYD k9 y el segundo es un taxi eléctrico Hyundai ioniq.

La figura 2.4 muestra los diferentes tipos de vehículos a estudiar. La tabla 2.3 muestra las principales características técnicas de estos vehículos [12] [13]. Para el caso de los buses eléctricos BYD k9, se destaca una autonomía de 176,1 km y la presencia de dos motores de

150 kW cada uno. En cambio, para los taxis eléctricos estos poseen una capacidad de baterías y potencia del motor menor a la presentada por los buses, sin embargo, poseen una mayor autonomía y un menor consumo. En los anexos A y B se puede encontrar mayor información técnica de estos vehículos [14].



Figura 2.4: Vehículos a estudiar: (a) Bus eléctrico BYD k9. (b) taxi eléctrico hyundai ioniq

Tabla 2.3: Características técnicas vehículos de estudio

| Característica | Bus | Taxi |
|-----------------------------|--------------|---------------|
| modelo | BYD k9 | Hyundai ioniq |
| Potencia [kW] | 300 (150 x2) | 100 |
| Capacidad de baterías [kWh] | 276,5 | 38,3 |
| Rendimiento [km/kWh] | 0,637 | 6,536 |
| Autonomía [km] | 176,1 | 250 |

El centro de energía de la Universidad de Chile, realizó un estudio llamado *Proyecto Ruta Sustentable* en el cual se busca demostrar casos de éxitos para impulsar que usuarios menos proclives al cambio tecnológico tengan la opción de analizar casos y mejorar su capacidad de toma de decisión [15]. Al igual que el presente estudio, en “Ruta sustentable” se monitorearon y estudiaron taxis y buses eléctricos, en este caso 22 taxis eléctricos durante el periodo comprendido desde enero 2020 a diciembre 2020, y un total de 101 buses eléctricos durante el periodo de agosto 2019 hasta agosto 2020.

Las figuras 2.5 y 2.6 muestran los principales resultados que se obtuvieron en este estudio. En estas figuras se puede observar como se relaciona o distribuye el rendimiento con la velocidad promedio, la distancia recorrida, la temperatura ambiente, el ascenso, el descenso y el SOC inicial. Para el caso de los buses no se presenta el gráfico entre temperatura ambiente y rendimiento.

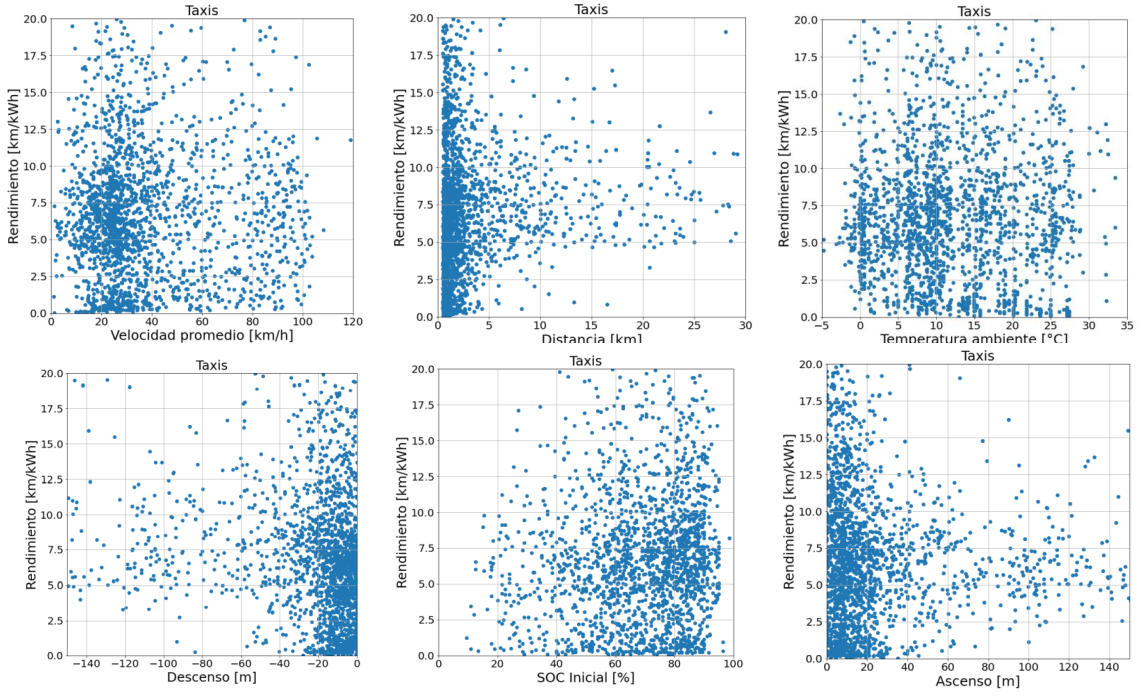


Figura 2.5: Resultados Ruta Sustentable: Taxis

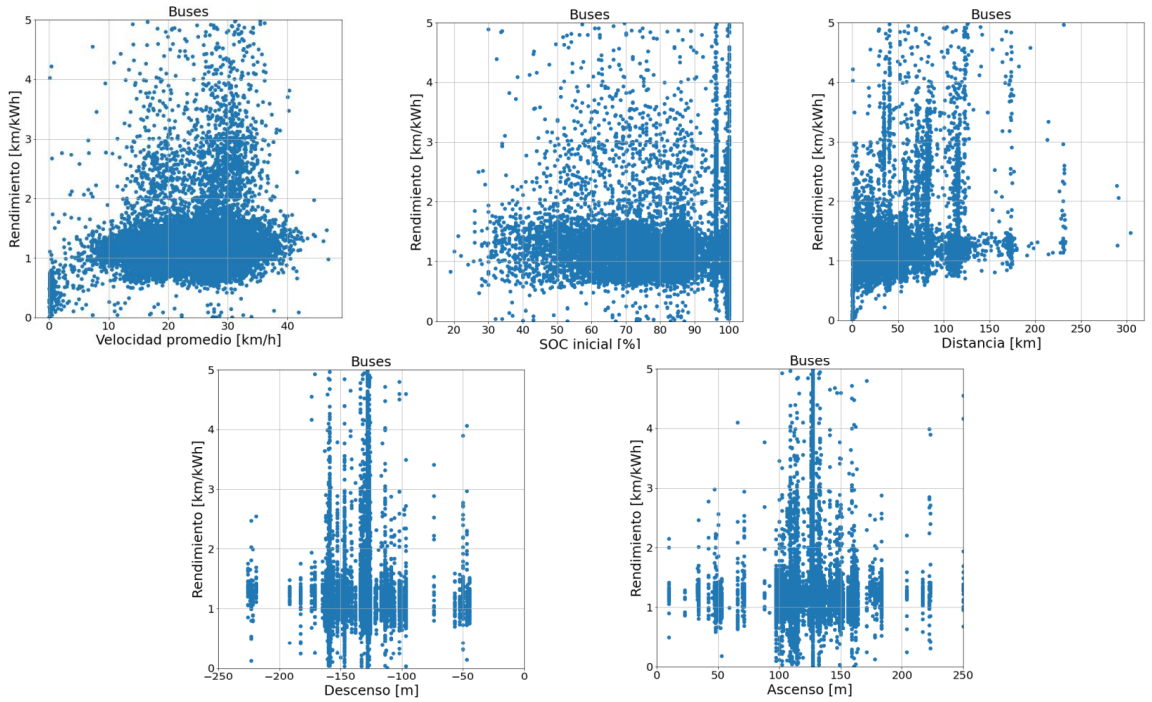


Figura 2.6: Resultados Ruta Sustentable: Buses

2.3. Agresividad

Con el fin de cuantificar la agresividad del conductor y analizar su efecto en el consumo energético de los vehículos eléctricos se emplean 3 parámetros diferentes, el principal

es *Ripple Aggressiveness* (RA), el cual consiste contabilizar la cantidad de cambios bruscos de velocidad en relación a la cantidad total de cambios de velocidad, el segundo se llama *Driver Aggressiveness* (DA) y es una variación del RA, que busca incluir la aceleración promedio como factor de agresividad, ya que dos recorridos pueden tener la misma agresividad y aceleraciones promedio que difieren considerablemente, el tercer parámetro con el cual se cuantificó la agresividad es la desviación estándar de la velocidad, este es el parámetro más simple y básico y consiste en considerar el viaje menos agresivo como aquel cuya velocidad no varió (desviación estándar nula) luego a mayor desviación estándar más agresivo se considera. A continuación se presenta en detalle el modelo planteado por Zifan Liu para cuantificar la agresividad tanto con el parámetro de RA como con DA [16] [17].

El modelo planteado por Liu se basa en las fluctuaciones de velocidad del ciclo, las fluctuaciones de velocidad se pueden dividir en dos: las fluctuaciones de baja frecuencia o de gran escala que están relacionadas principalmente con las condiciones del camino y las fluctuaciones de alta frecuencia o de baja escala que están relacionadas con las características de conducción. Usualmente la agresividad es cuantificada con la velocidad, aceleración o jerk (derivada de la aceleración con respecto al tiempo) pero tomando solo factores promedios y dejando de lado detalles importantes como lo son las fluctuaciones o variaciones rápidas y bruscas de velocidad.

Los parámetros *Ripple aggressiveness* y *Driver aggressiveness* se construyen a través de los perfiles de conducción de velocidad y *jerk* (variación de la aceleración con respecto al tiempo). A modo general, se tiene que a mayor RA, mayor es la agresividad de la conducción.

La principal herramienta matemática de este modelo es la transformada de Fourier discreta (ecuación 2.1), ya que para cuantificar la agresividad de conducción, los datos se deben procesar en el dominio de las frecuencias.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (2.1)$$

En esta ecuación, una señal de largo N, se transfiere al dominio de las frecuencias, en el cual se tienen N elementos oscilatorios sinusoidales (X(k)), la frecuencia digital de estos elementos es $\omega_{digital} = \frac{2\pi k}{N}$, la cual se relaciona con la frecuencia real en [Hz] según la ecuación 2.2:

$$f_{real} = \frac{f_s}{2\pi} \omega_{digital} \quad (2.2)$$

En donde f_s es la frecuencia de muestreo de la señal estudiada. Debido al *Aliasing* la frecuencia real máxima corresponde a $f_s/2$. La transformada de Fourier discreta es una herramienta numérica que trata con señales finitas y un número finito de operaciones, para aplicar la transformada de Fourier discreta (DFT) de forma computacional se suele usar la transformada de Fourier rápida (FFT) dado que es un algoritmo rápido y de cálculo eficiente para la DFT.

El teorema de Parseval (ecuación 2.3), vincula el dominio temporal con el de las frecuencias, basándose en la conservación de la energía, ya que en ambos dominios las energías deben ser iguales. En el lado izquierdo se tiene la energía de la señal finita en el dominio del

tiempo, mientras que en el lado derecho se tiene la energía en el dominio de las frecuencias normalizada.

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (2.3)$$

Los términos del lado derecho de la ecuación 2.3 ($\frac{1}{N}|X(k)|^2$) describen lo que se conoce como el periodograma. En el caso de señales cuya media sea cero, el teorema de Parseval representa una directa interpretación física: el área debajo de la curva del periodograma se aproxima a la varianza de la señal en el espacio temporal.

2.3.1. Procesamiento de datos

Para procesar los datos, en primer lugar se deben eliminar los datos nulos, es decir, no se considera cuando el vehículo está detenido. Esto, ya que los periodos inactivos no afectan al RA pero sí afectarían los componentes de frecuencia, por lo que se eliminan. Además, se debe realizar un ajuste promedio, en el cual a cada dato se resta el valor promedio, esto no afecta al resultado final de *Ripple aggressiveness*. Con esto se puede aplicar el teorema de Parseval.

En segundo lugar, se calcula la transformada de Fourier discreta, siguiendo la ecuación 2.1. Una vez que se tienen los datos en el dominio de las frecuencias, se utiliza el teorema de Parseval para determinar cierto porcentaje del área bajo la curva del espectro de Fourier, que represente la proporción de la varianza del perfil de velocidades en el dominio del tiempo que caracterice los aspectos de conducción. Para el estudio referenciado, se considera que las características básicas de conducción son descritas al cubrir un 99% de la varianza. La frecuencia que satisface esta relación se denomina frecuencia de corte.

De acuerdo al estudio referenciado, para el análisis de velocidad y de aceleración se tienen tendencias armónicas de bajas frecuencias, por lo que conviene utilizar la segunda derivada de la velocidad, es decir, el *jerk* permite separar las fluctuaciones de la rapidez de acuerdo a las características del conductor con las características propias del recorrido. En la figura 2.7 se pueden observar las tendencias armónicas de baja frecuencia de las señales de velocidad y aceleración, mientras que para el *jerk*, es posible observar *peaks* de altas y bajas frecuencias. En otras palabras, después de diferenciar dos veces con respecto al tiempo, se pueden observar las fluctuaciones rápidas de velocidad y se pueden considerar separadas de las condiciones externas o de tráfico.

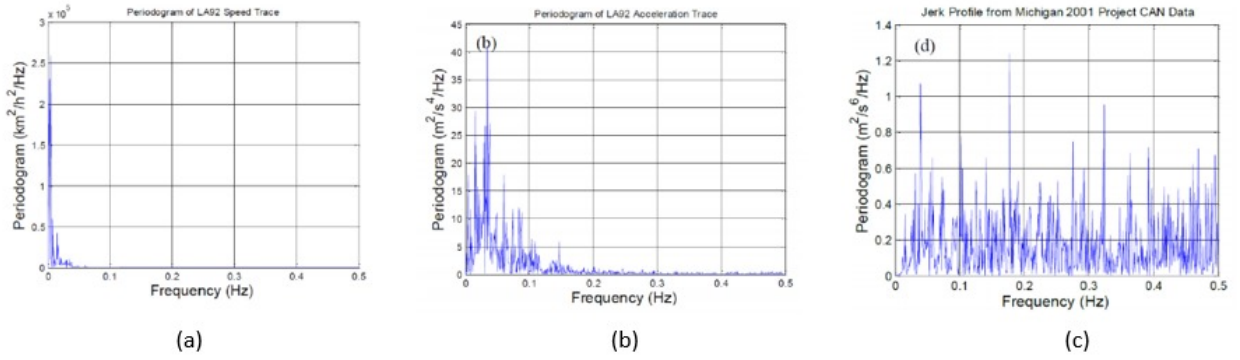


Figura 2.7: Espectros de Fourier de: (a) Espectro de Fourier de la velocidad, (b) Espectro de Fourier de la aceleración y (c) Espectro de Fourier del jerk

Finalmente se calcula el *Ripple Aggressiveness* a partir de la ecuación 2.4 en la cual AF es la suma de los peaks de alta frecuencia y BF es la suma de los peaks de baja frecuencia, la alta y baja frecuencia está definida a partir de la frecuencia de corte mencionada anteriormente.

$$RA = \frac{AF}{BF + AF} \quad (2.4)$$

Las altas frecuencias (AF) se atribuyen a las características particulares de conducción del individuo mientras que las bajas frecuencias (BF) corresponden principalmente a las características del tráfico. Con esto se puede cuantificar la variación de energía entre altas frecuencias y bajas frecuencias.

El estudio referenciado encuentra como principal resultado que la agresividad medida como RA, muestra relación con el consumo energético (y la eficiencia energética) a partir de agresividades superiores a 0,8. Se nombran tres categorías de perfil de conducción: calmado, normal y agresivo, este último cuando el RA es mayor a 0,8.

De acuerdo a Zifan Liu, creador de este modelo, el parámetro RA presenta una inconsistencia que se puede observar en la figura 2.8, en esta figura se pueden ver dos recorridos con un RA similar a pesar de que poseen aceleraciones medias muy diferentes, esto se debe principalmente a diferentes magnitudes en el periodograma, por lo que se propone un segundo parámetro, *Driver Aggressiveness*. La ecuación 2.5 expresa como calcular este parámetro, donde Jfprom es el valor promedio del periodograma del jerk.

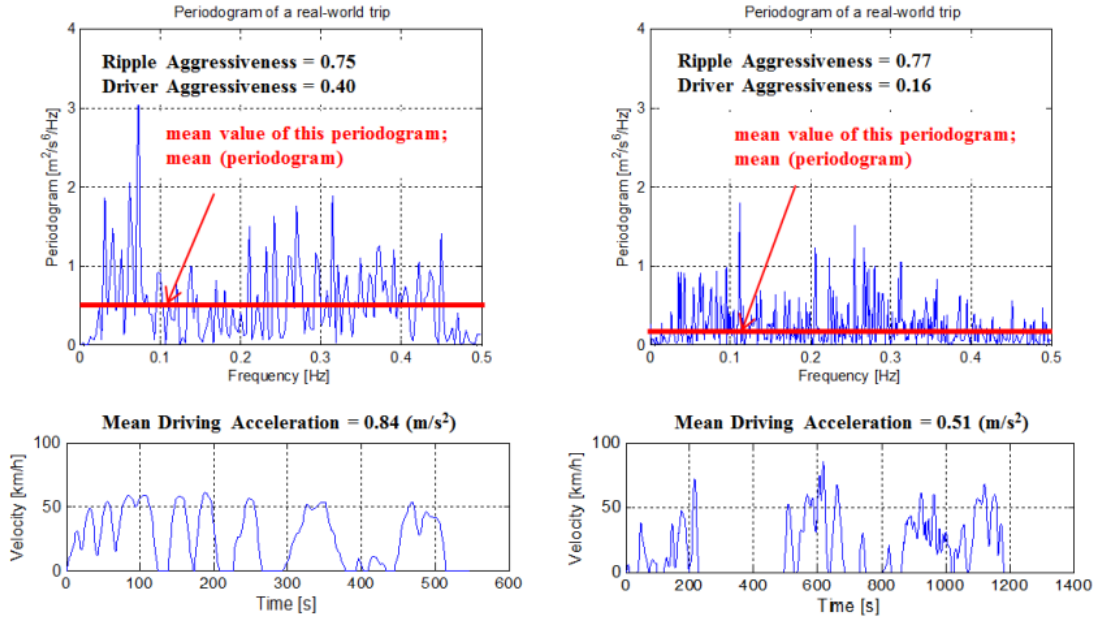


Figura 2.8: Inconsistencia encontrada en el Ripple Aggressiveness

$$DA = Jf_{prom} \cdot \frac{AF}{BF + AF} \quad (2.5)$$

Con el *Driver aggressiveness* también se clasifica en calmado, normal y agresivo siendo este último cuando se supera 0,21 y normal entre 0,13 y 0,21. Los resultados destacan que se genera una fuerte relación entre el consumo y el DA especialmente para viajes cortos (menores a 6 km).

2.4. Estudio del arte

Con el aumento en los últimos años en el uso y venta de VE, también ha existido un aumento en los estudios realizados sobre estos vehículos. En particular, con respecto al efecto de la agresividad de la conducción en la eficiencia energética del los autos. A continuación se describen los principales estudios.

En 2012, Bingham [18] estudió como el consumo energético se ve afectado por el estilo de conducción. Para esto, utilizó un Smart ED 2008 y ciclos de conducción de 40 km, basándose en la NEDC (new european driving cycle), esto es un ciclo de conducción utilizado para evaluar objetivamente el impacto ambiental de un automóvil. La agresividad la describió de acuerdo a la cantidad de aceleraciones y desaceleraciones junto con la desviación estándar de la aceleración. Entre sus principales resultados se encuentra que el estado de la batería se reduce en un 57% cuando se maneja de forma agresiva, mientras que en tan solo 39% cuando es de forma moderada. Además el consumo energético aumenta en un 32,5% consumiéndose 4 kWh al conducir de forma moderada y 5,3 kWh cuando es de forma agresiva.

En 2014, Alvarez [19], planteó un modelo utilizando MATLAB/Simulink en el cual simuló

un vehículo eléctrico para estudiar el efecto del comportamiento del conductor, resaltando que el estilo de conducción cambia cuando la carga de la batería es menor a 50 %. Los principales resultados del estudio fueron que el efecto del comportamiento del conductor es más notorio en zonas interurbanas que en zonas urbanas, además, el conductor agresivo recorre menos distancia con el mismo consumo y en un mismo recorrido consume más. Con respecto a la regeneración, se determina que esta no afecta mayormente ya que el tiempo de regeneración es corto y las baterías se recargan lentamente.

En 2021, Fernandes [20], estudia el efecto de la agresividad del conductor en vehículos híbridos, poniendo el foco en las emisiones que este realiza. Se estudiaron tres rutas con un Toyota full HEV y se tomaron datos por segundo en las rutas. La agresividad se consideró basándose en la distribución de aceleración y de *jerk*. El fin del estudio es demostrar que a partir del *jerk* es posible estimar las emisiones de CO₂, material particulado (PM) y NO_x. Se encuentra que existe una relación entre CO₂ y el *jerk* y entre el PM y el *jerk* (R^2 entre 0,72 y 0,99) sin embargo no existe una relación con el NO_x (R^2 menor a 0,52).

Zifan Liu planteó una metodología para cuantificar la agresividad del conductor la cual fue descrita en la sección 2.3 [16]. Posteriormente, en 2017, utilizó este modelo para estudiar los efectos que se tienen en las baterías cuando se conduce de forma más agresiva en un vehículo híbrido [17]. Entre sus principales resultados se destaca que conducir de forma agresiva acorta la duración de los tiempos de carga y descarga mientras que manejar a altas velocidad alarga estos tiempos, además, manejar de forma agresiva estimula a más grandes tasas de corriente de carga y descarga. Daniel Carbacho, también utilizó este modelo para analizar el efecto de la agresividad del conductor en el comportamiento de un VE, específicamente para rutas largas medianas y cortas [21]. Utilizando un Nissan LEAF 2018, encontró que la principal correlación entre indicadores energéticos y RA se encuentra en rutas cortas, obteniendo que para rutas cortas, a mayor agresividad mejor rendimiento. Para las rutas largas se tiene una relación inversa en donde el consumo eléctrico aumenta con la agresividad y para las rutas medianas no se encontró relación.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Pre-procesamiento de datos

Para poder determinar el efecto de la agresividad del perfil de conducción en el consumo energético de vehículos eléctricos se utilizaron datos reales de operación. En primer lugar se debieron extraer los datos que estaban en formato matlab a excel. Una vez en excel se filtró la información, dejando solo las columnas de interés, estas fueron:

- Hora
- Latitud
- Longitud
- Altitud
- Corriente [A]
- Voltaje [V]
- Estado de carga (SOC) [%]
- Velocidad [km/h]

Para el caso particular de los taxis se consideró también *normal charge port* y *rapid charge port* para determinar momentos en que se cargó el vehículo. Para el caso de los buses esto se vio basándose en el estado de carga (SOC).

Una vez obtenidas las características principales de los recorridos de los vehículos que permiten cuantificar la agresividad, el consumo energético y los kilómetros recorridos se procede a determinar los recorridos para lo cual se consideraron dos criterios:

1. Periodo de inactividad por más de 8 minutos para taxis y 30 minutos para buses (cuando la velocidad es cero).
2. Que haya sido cargado.

Si se cumple cualquiera de las dos condiciones, se considera que termina el recorrido y comienza uno nuevo. Cada recorrido fue guardado en una planilla excel con su información particular, con esta metodología se definieron 129 recorridos de buses, todos del mismo bus, y 102 recorridos de taxis de 5 vehículos diferentes.

3.2. Procesamiento de datos

Una vez determinados y definidos los recorridos se procedió a cuantificar la agresividad, el consumo energético y los kilómetros recorridos. Los dos primeros se cuantificaron mediante códigos de *Python spyder* (ver Anexo C) mientras que los kilómetros recorridos se estimaron utilizando *gps visualizer* [22] y *google earth* [23].

3.2.1. Cuantificación agresividad

El procedimiento para cuantificar la agresividad, mediante el parámetro Ripple Aggressiveness y Driver Aggressiveness utilizando *Python spyder* se explica a continuación:

1. Importar las librerías: Pandas, Numpy, Scipy.fftpack, matplotlib.pyplot y scipy.signal.
2. Importar el recorrido de excel a python.
3. Transformar cada columna de interés en una lista de python.
4. Transformar la lista que describe el tiempo del formato *hh:mm:ss* a segundos y generar una lista que describa la frecuencia de muestreo.
5. Calcular la aceleración y el jerk, esto se hace derivando numéricamente, es decir, se divide la diferencia de velocidad por la diferencia de tiempo para cada momento muestreado, y lo mismo para el jerk. La figura 3.1 muestra como se comporta la velocidad, aceleración y jerk con el paso del tiempo.

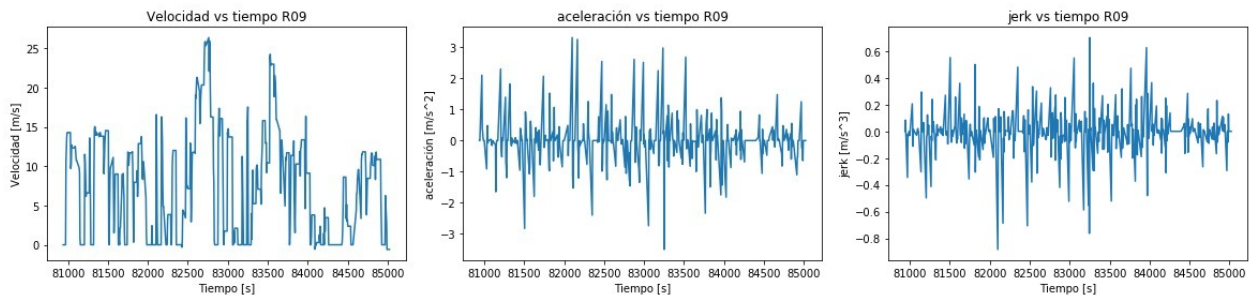


Figura 3.1: Velocidad, aceleración y jerk en el tiempo del recorrido n°9 de taxis

6. A continuación, se deben borrar los periodos de inactividad, en otras palabras, se eliminan de la lista de velocidad todos los elementos cuya velocidad es cero.
7. Una vez eliminados los periodos de inactividad, se debe realizar un ajuste promedio a la velocidad, de esta forma, a cada elemento se le resta el promedio y se obtiene una nueva lista de velocidad cuyo promedio es nulo.
8. Utilizando *Scipy.fftpack* se transforma la velocidad al dominio de las frecuencias y se encuentra la amplitud de esta en el dominio de Fourier.
9. Se construye el periodograma para lo cual se calcula la frecuencia digital y la frecuencia real. Se ilustra un periodograma de velocidad vs frecuencia en la figura 3.2

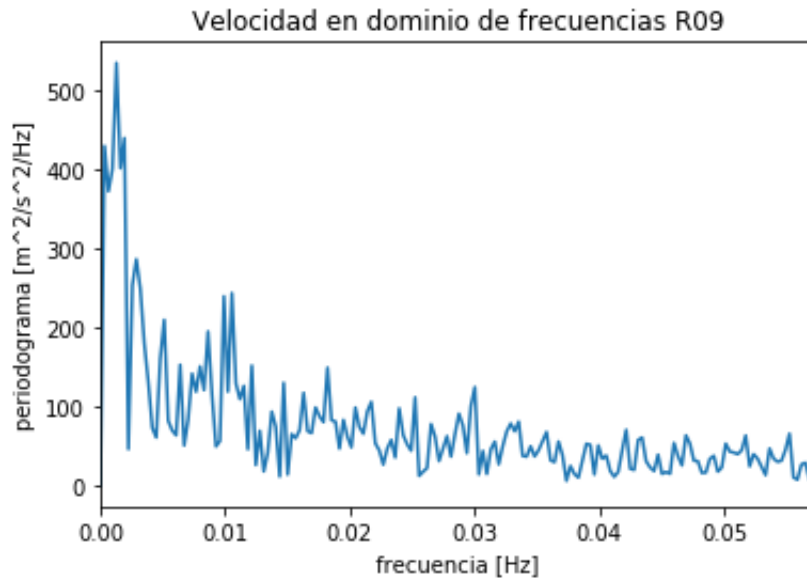


Figura 3.2: Periodograma del recorrido n°9 de taxis. Velocidad vs frecuencia

10. Calcular el área bajo la curva del gráfico de velocidad en el dominio de las frecuencia, es decir, calcular la integral.
11. Encontrar la frecuencia de corte, es decir, la frecuencia con la que se abarca un cierto porcentaje de la integral, para este estudio se consideraron dos casos: que la frecuencia de corte represente la frecuencia con la que se abarca un 90 % y un 99 % del área bajo la curva.
12. Se repiten los pasos 6,7 y 8 para el Jerk, es decir, se eliminan los periodos de inactividad (velocidad nula) de la lista de jerk, se realiza un ajuste promedio a este y se transforma al dominio de las frecuencias utilizando la transformada de Fourier, con lo que se encuentra el periodograma del jerk, como el de la figura 3.3.

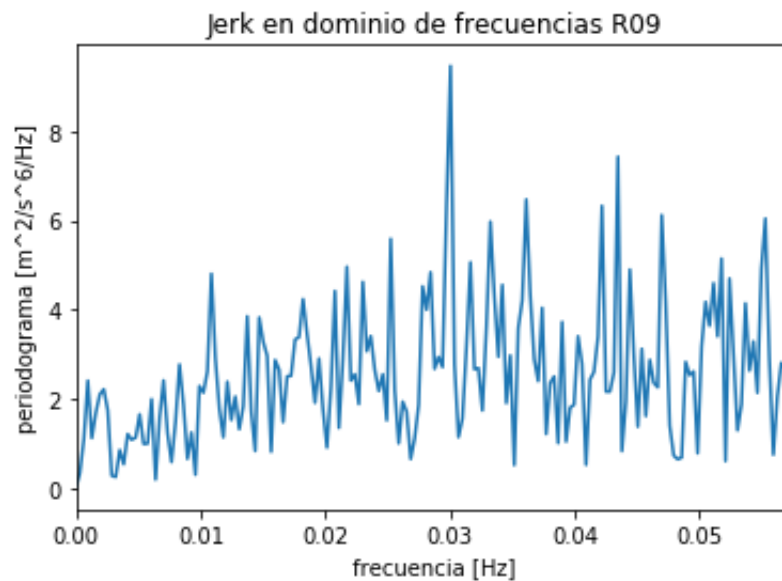


Figura 3.3: Periodograma del recorrido n°9. Jerk vs frecuencia

13. Para encontrar el RA, se encuentran los peaks del periodograma del jerk utilizando la función *find_peaks* que devuelve los índices donde hay peaks. Con esto se pueden encontrar la cantidad de peaks de baja frecuencia (LF) y de alta frecuencia (HF) y se obtiene el Ripple Aggressiveness cómo se señala en la ecuación 2.4. Cuando se usó la frecuencia de corte en un 90 % de la varianza se le llamó a ese Ripple aggressiveness como RA0.9 mientras que si se consideró el 99 % de la varianza se le llamó RA0.99.
14. Para determinar el DA, se encontró el promedio de Jerk en el dominio de las frecuencias y con esto el DA será el RA multiplicado por el jerk promedio. Cuando se usó la frecuencia de corte en un 90 % de la varianza se le llamó a ese Driver aggressiveness como DA0.9 mientras que si se consideró el 99 % de la varianza se le llamó DA0.99.

Además se cuantificó la agresividad mediante la desviación estándar de la velocidad, lo cual se hizo directamente en la planilla excel de cada recorrido mediante la función *Desvest.p*.

3.2.2. Cuantificación consumo energético

Para cuantificar el consumo energético se utilizaron dos métodos:

1. Estado de carga: Se tomó la diferencia del estado de carga entre el inicio del recorrido y el final obtenidos en la planilla de cada recorrido, es decir,

$$dSOC = SOC_{final} - SOC_{inicial} \quad (3.1)$$

Además, dado que la variación del estado de carga cambia según el estado de carga inicial, se tomaron 3 categorías que se reflejan en la tabla 3.1

Tabla 3.1: Categorías de SOC inicial

| | Buses | Taxis |
|-------------|------------|------------|
| Categoría 1 | 100-90 | 100-80 |
| Categoría 2 | 90-80 | 80-60 |
| Categoría 3 | menor a 80 | menor a 60 |

2. Energía consumida: Para poder obtener la energía consumida en cada recorrido, en primer lugar se debe obtener la potencia de cada momento muestreado esto es:

$$P = V \cdot i \quad (3.2)$$

Donde P es la potencia en el momento [W], V es el voltaje [V] e i es la intensidad de corriente [A].

Una vez obtenida la potencia en cada momento, la energía consumida será la integral de la potencia con respecto al tiempo. En el caso de un análisis discreto esto corresponde a multiplicar la potencia con el paso de tiempo y sumar cada una de esas multiplicaciones.

3.2.3. Cuantificación distancia recorrida

Para poder obtener la distancia que cada recorrido tuvo se utilizaron dos programas: *Google earth* y *GPS visualizer*. *GPS visualizer* es una plataforma online y gratuita que crea

mapas a partir de información geográfica. Para obtener los kilómetros recorridos y la ilustración gráfica de cada trayecto, se debieron emplear tres simples pasos que se deben repetir para cada recorrido:

1. Crear una lista de coordenadas con la latitud y longitud de cada momento.
2. Introducir esta lista en *GPS visualizer* y exportar el mapa en *Google earth*.
3. En google earth se visualiza la trayectoria y calcula la distancia recorrida. La figura 3.4 muestra visualmente cual fue la trayectoria del recorrido n°1 de los taxis y el recorrido n°1 del bus.

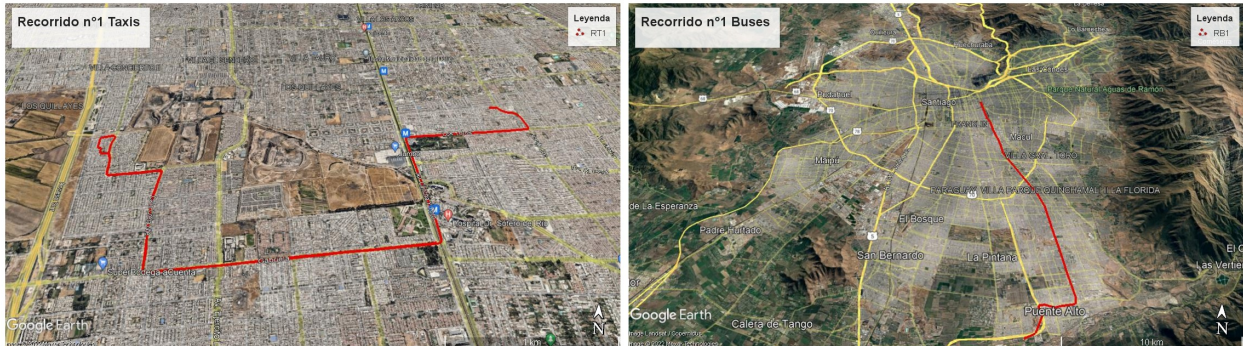


Figura 3.4: Visualización de recorridos

Finalmente se generaron dos planillas (una para los buses y otra para los taxis) con las características principales de cada recorrido, a esta planilla se le añadiría posteriormente la cuantificación de la agresividad (RA, DA y desviación estándar de la velocidad), la cuantificación del consumo energético (medido en kWh y el soc) y los kilómetros recorridos, a medida que se obtenían resultados. Las principales columnas de esta planilla fueron:

- Número de recorrido
- vehículo que realiza el recorrido
- hora de inicio
- hora de término
- kilómetros recorridos
- RA0.9
- RA0.99
- DA0.9
- DA0.99
- Desviación estándar velocidad (Desv vel) [km/h]
- Consumo energético [kWh]

- SOC inicial
- SOC final
- Rendimiento en base a consumo energético [km/kWh]
- Rendimiento en base a diferencia de SOC [km/dSOC]
- Velocidad media del recorrido [km/h]

A partir de esta planilla se eliminaron datos que presentaron resultados cuestionables o poco creíbles, estos fueron los que mostraron una diferencia de estado de carga negativo, o rendimientos excesivamente altos (superiores a 20 km/kWh), quedaron finalmente 115 recorridos para los buses y 89 recorridos de los taxis. Con estos datos se puede comenzar el post-procesamiento de los datos y la obtención de los resultados.

3.3. Post-procesamiento de datos

Para el post-procesamiento de datos y la obtención de los resultados se decidió mostrar los resultados en cinco categorías diferentes: Estudio de máximos y mínimos, Gráficos de dispersión, Agresividad según características del viaje, recorridos similares y agresividades similares.

Inicialmente, se genera una tabla comparativa entre los taxis y los buses con los promedios de las principales características, estos son: cantidad de recorridos, RA0.9, DA0.9, Desv vel y Rendimiento basado en consumo energético.

3.3.1. Gráficos de dispersión

En los gráficos de dispersión se muestra como se distribuyen los múltiples parámetros de agresividad estudiados frente a los parámetros de rendimiento obtenidos (basado en el SOC y en la energía consumida). Para esto se utiliza la función de python *plt.scatter(Agresividad, Rendimiento)*, por lo tanto se obtuvieron múltiples gráficos de dispersión de los cuales se muestran 7 para cada tipo de vehículo que serán de utilidad para el análisis, estos son:

1. RA0.9 vs Rendimiento en base a consumo energético.
2. DA0.9 vs Rendimiento en base a consumo energético.
3. Desv vel vs Rendimiento en base a consumo energético.
4. RA0.9 vs Rendimiento en base a diferencia de SOC.
5. DA0.9 vs Rendimiento en base a diferencia de SOC..
6. Desv vel vs Rendimiento en base a diferencia de SOC..
7. RA0.99 vs Rendimiento en base a consumo energético.

Es importante mencionar, que en los gráficos de dispersión que muestran el rendimiento medido en base al SOC ([km/dSOC]) se diferencia de acuerdo al SOC inicial según lo expresado en la tabla 3.1.

3.3.2. Máximos y mínimos

Se identifican los recorridos que presentan la mayor y menor agresividad para cada tipo de vehículo (agresividad medida con el parámetro de RA0,9) y se comparan sus principales características con el fin de determinar que domina esta diferencia. Las características comparadas son:

- Hora de inicio y termino.
- Cantidad de datos tomados en el recorrido.
- Distancia recorrida.
- Consumo energético.
- DA0.9
- Desv vel.

Además se muestran las gráficas de velocidad vs tiempo, aceleración vs tiempo y los periodogramas de velocidad vs frecuencia y jerk vs frecuencia, con esto se espera visualizar gráficamente las diferencias presentadas de la agresividad del perfil de conducción.

3.3.3. Agresividad según características del viaje

Una vez vista la relación que tiene la agresividad de cada recorrido con su rendimiento en base a los gráficos de dispersión. Se procedió a mostrar como se comporta la agresividad según ciertas características específicas de los recorridos. Estas fueron: Horario del recorrido, distancia recorrida, y velocidad media que tuvo el viaje. Los criterios para la categorización se muestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Criterio para categorización de características de cada viaje

| Categoría | Subcategoría | Bus | Taxi |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Horario | Mañana | 6 am a 12 pm | 6 am a 12 pm |
| | Tarde | 12 pm a 8 pm | 12 pm a 8 pm |
| | Noche | 8 pm a 6 am | 8 pm a 6 am |
| Distancia [km] | Corta | <30 | <7 |
| | Media corta | 30 a 60 | 7 a 15 |
| | Media Larga | 60 a 110 | 15 a 23 |
| | Larga | >110 | >23 |
| Velocidad media [km/h] | Lento | <25 | <40 |
| | Rapido | >25 | >40 |

Por lo tanto, para comprender como se ve afectada la agresividad del perfil de conducción y el rendimiento del recorrido según las características del viaje, se procedió de la siguiente manera:

1. Se calcula la agresividad promedio de los recorridos de cada subcategoría. Por ejemplo, la agresividad promedio de los vehículos que circularon en la mañana. Se usa el parámetro

RA0.9, DA0.9 y Des vel. Además se calcula el rendimiento promedio de estos recorridos basado en consumo energético.

2. Se calcula el error asociado, a los promedios calculados en el paso 1. Esto se hace con la siguiente ecuación, para cada parámetro en cada categoría:

$$err = \frac{1.96 \cdot DV}{\sqrt{N}} \quad (3.3)$$

Donde:

- err: error asociado al promedio de cada parámetro de cada categoría.
- DV: Desviación estándar.
- N: Cantidad de recorridos de cada subcategoría.

3. Se realiza un gráfico de barras con error asociado utilizando la función de python `plt.bar()`

3.3.4. Recorridos similares

Mediante *Google earth* y la posibilidad ya descrita de visualizar los recorridos, se identifican grupos de recorridos similares, para analizar como cambia la agresividad del perfil de conducción a pesar de que el recorrido sea similar. La tabla 3.3 muestra los tres grupos de recorridos similares estudiados.

Tabla 3.3: Grupos de recorridos similares estudiados

| | |
|---------|------------------|
| Grupo 1 | Recorrido n° 3 |
| | Recorrido n° 19 |
| | Recorrido n° 68 |
| Grupo 2 | Recorrido n° 15 |
| | Recorrido n° 36 |
| | Recorrido n° 47 |
| Grupo 3 | Recorrido n° 101 |
| | Recorrido n° 99 |

Dentro de cada grupo se compara: La agresividad (RA0.9, DA0.9, y Desv vel), Rendimiento (ambos casos), SOC inicial y horario del recorrido. Además se muestran las gráficas de velocidad vs tiempo, aceleración vs tiempo y los periodogramas de velocidad vs frecuencia y jerk vs frecuencia, para el grupo 1 con esto se espera visualizar graficamente las diferencias presentadas de la agresividad del perfil de conducción y profundizar la discusión iniciada al estudiar los máximos y mínimos.

3.3.5. Agresividades similares

Se identifican recorridos que tengan agresividades similares, pero distintos rendimientos para poder identificar que factor o parámetro genera esta diferencia. Al tener cuantificada la agresividad basta con tomar recorridos con agresividades similares. Se seleccionan cuatro grupos de recorridos, un grupo que tenga agresividad sobre el promedio y otro que tenga

agresividad bajo el promedio para cada vehículo. Para este escenario, se considera el parámetro de agresividad de Ripple aggressiveness tomando un 90% de la varianza, es decir, el RA0,9. La tabla 3.4 muestra los grupos que se generaron, los recorridos que pertenecen a los grupos y la agresividad RA0,9 de cada uno de los recorridos.

Tabla 3.4: Grupos de agresividades similares estudiadas

| | | |
|------------------------------|-----------------|---------------|
| Grupo 4: Taxi bajo la media | recorrido n°38 | RA0.9 = 0,596 |
| | recorrido n°40 | RA0.9 = 0,593 |
| | recorrido n°57 | RA0.9 = 0,597 |
| | recorrido n°88 | RA0.9 = 0,593 |
| Grupo 5: Taxi sobre la media | recorrido n°2 | RA0.9 = 0,683 |
| | recorrido n°6 | RA0.9 = 0,683 |
| | recorrido n°62 | RA0.9 = 0,683 |
| | recorrido n°68 | RA0.9 = 0,683 |
| Grupo 6: Bus bajo la media | recorrido n°35 | RA0.9 = 0,526 |
| | recorrido n°36 | RA0.9 = 0,526 |
| | recorrido n°37 | RA0.9 = 0,526 |
| | recorrido n°80 | RA0.9 = 0,526 |
| Grupo 7: Bus sobre la media | recorrido n°4 | RA0.9 = 0,6 |
| | recorrido n°12 | RA0.9 = 0,6 |
| | recorrido n°38 | RA0.9 = 0,6 |
| | recorrido n°76 | RA0.9 = 0,6 |
| | recorrido n°124 | RA0.9 = 0,6 |

Para cada uno de estos grupos se generan tablas comparativas donde se pueden confrontar los principales parámetros estudiados en este trabajo, estos fueron: Agresividad (RA0.9, DA0.9, Desv vel), kilómetros recorridos, consumo energético, rendimiento basado en consumo energético, hora de inicio del recorrido, hora de termino, SOC inicial, rendimiento basado en SOC y velocidad media.

Capítulo 4

Resultados

La tabla 4.1 muestra una comparación entre las características principales de la agresividad del perfil de conducción obtenidas tanto para buses como para taxis.

Tabla 4.1: Comparación Taxis vs Buses

| | # Recorridos | RA 0.9 promedio | DA 0.9 promedio | Desv. Estándar velocidad [km/h] | Rendimiento promedio [Km/kWh] |
|--------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Taxis | 89 | 0.635 | 1.485 | 25.075 | 8.605 |
| Buses | 115 | 0.549 | 0.00703 | 21.229 | 1.186 |

4.1. Dispersión entre agresividad y consumo energético

4.1.1. Taxis

La figura 4.1 muestra como se relaciona la agresividad con respecto al rendimiento del taxi ([km/kWh]). En estos gráficos cada punto azul representa un recorrido. Se muestran la dispersión de la agresividad frente al rendimiento para cuatro parámetros de agresividad diferentes, el eje x corresponde a las agresividad del perfil de conducción y el eje y al rendimiento. Además se explicita el factor de correlación R^2 de cada gráfico de dispersión.

Posteriormente, la figura 4.2 muestra la dispersión de la agresividad frente al rendimiento basado en la diferencia del estado de carga. En esta figura los recorridos están diferenciados por color según el estado de carga que tenían al iniciar el recorrido de acuerdo a la tabla 3.1.

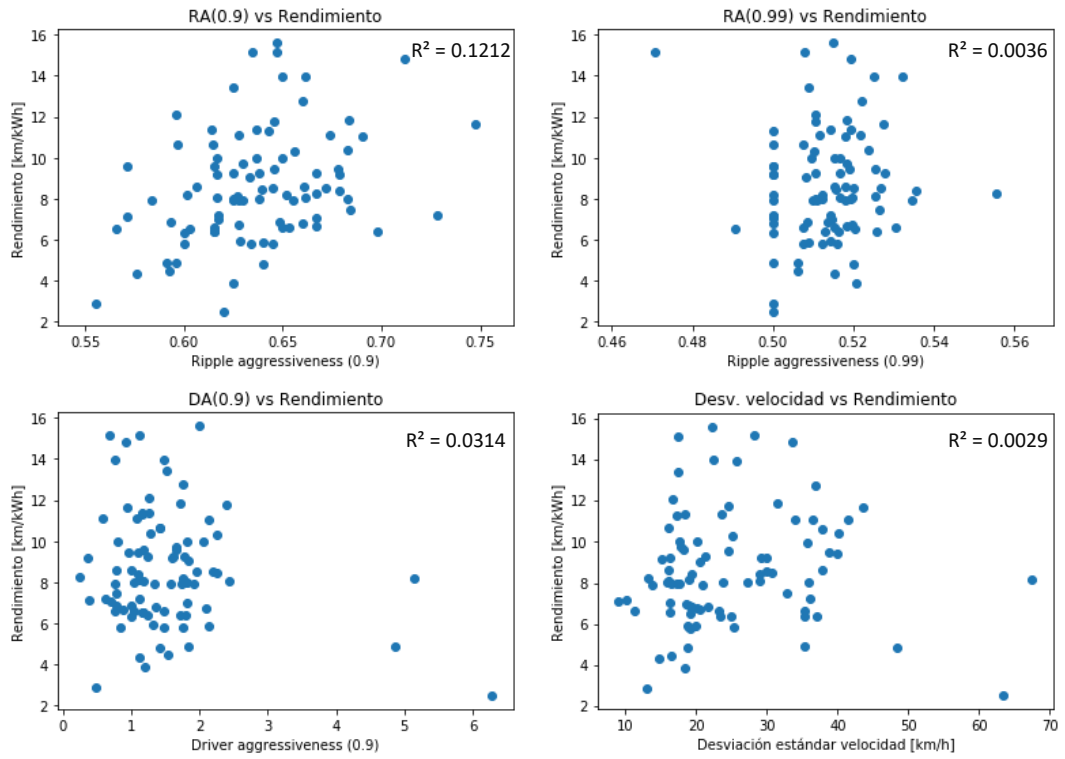


Figura 4.1: Relación entre agresividad y rendimiento basado en consumo energético: Taxi

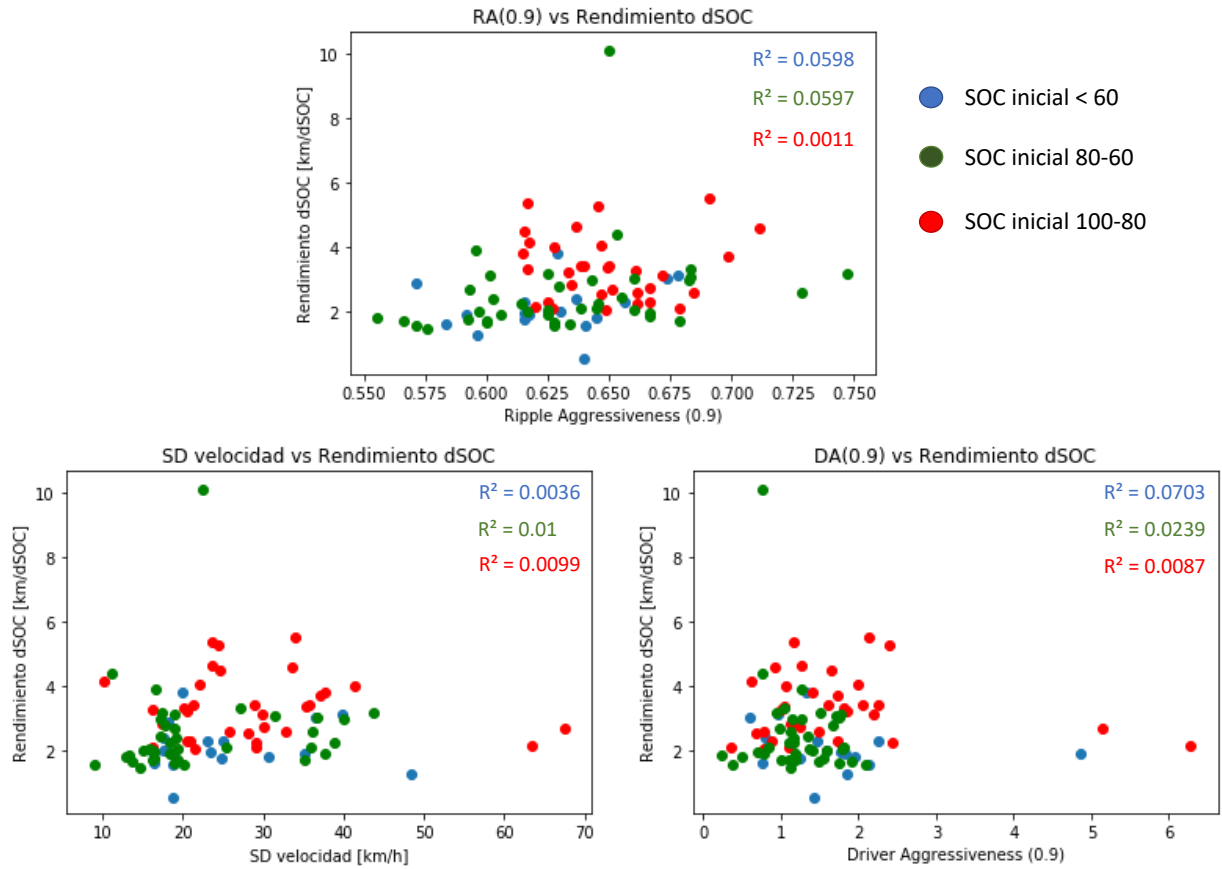


Figura 4.2: Relación entre agresividad y rendimiento basado en SOC: Taxi

4.1.2. Buses

La figura 4.3 muestra como se relaciona la agresividad con respecto al rendimiento del bus ([km/kWh]). En estos gráficos cada punto azul representa un recorrido. Se muestran la dispersión de la agresividad frente al rendimiento para cuatro parámetros de agresividad diferentes, el eje x corresponde a las agresividad del perfil de conducción y el eje y al rendimiento. Además se explicita el factor de correlación R^2 de cada gráfico de dispersión.

Posteriormente, la figura 4.4 muestra la dispersión de la agresividad frente al rendimiento basado en la diferencia del estado de carga. En esta figura los recorridos están diferenciados por color según el estado de carga que tenían al iniciar el recorrido de acuerdo a la tabla 3.1.

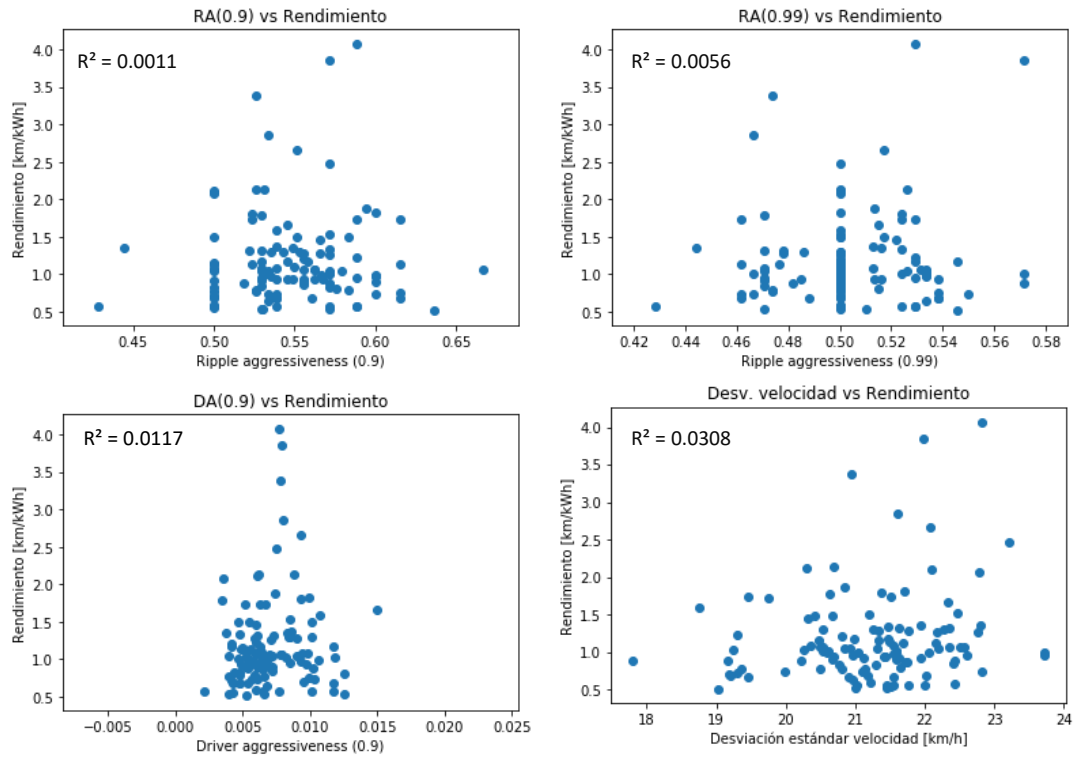


Figura 4.3: Relación entre agresividad y rendimiento basado en consumo energético: Bus

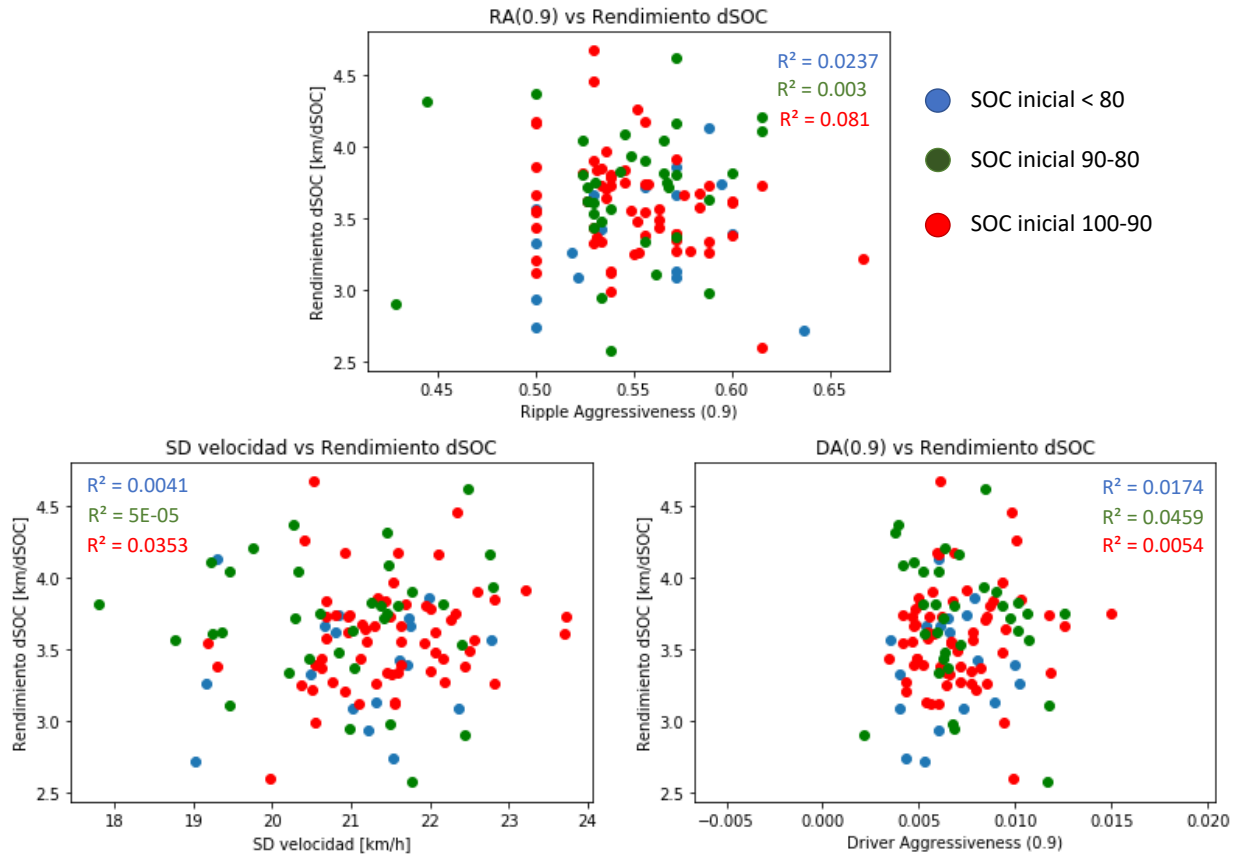


Figura 4.4: Relación entre agresividad y rendimiento basado en SOC: Bus

4.2. Estudio de máximos y mínimos

A continuación se muestran los resultados de los recorridos que presentaron máxima agresividad (medida en RA0,9). En primer lugar se muestra el máximo y mínimo de los taxis y posteriormente de los buses. Para cada caso, se muestra una tabla comparando las principales características de los recorridos y posteriormente se muestran los gráficos para comparar visualmente la agresividad.

Tabla 4.2: Características máximos y mínimos: Taxis

| | Máximo | Mínimo |
|---------------------------------|---------------|-------------|
| Recorrido | 67 | 30 |
| RA0,9 | 0.747 | 0.556 |
| Hora de inicio y termino | 14:12 - 14:38 | 0:44 - 1:03 |
| Cantidad de datos | 310 | 134 |
| Distancia recorrida | 23.731 | 3.689 |
| Consumo energético | 2.034 | 1.287 |
| DA0,9 | 0.945 | 0.489 |
| Desv vel | 43.658 | 13.002 |

4.2.1. Taxis

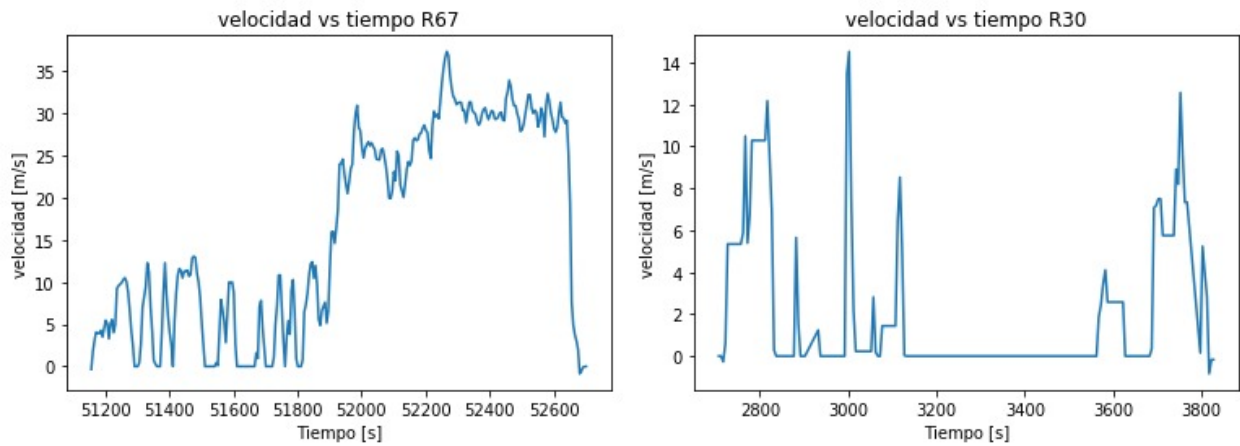


Figura 4.5: Velocidad vs tiempo: máximos y mínimos (Taxis)

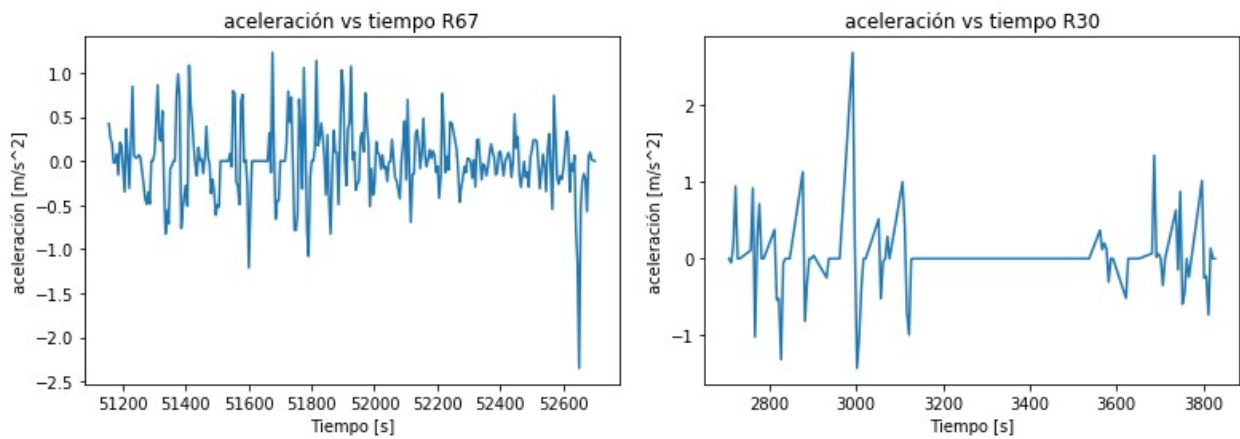


Figura 4.6: Aceleración vs tiempo: máximos y mínimos (Taxis)

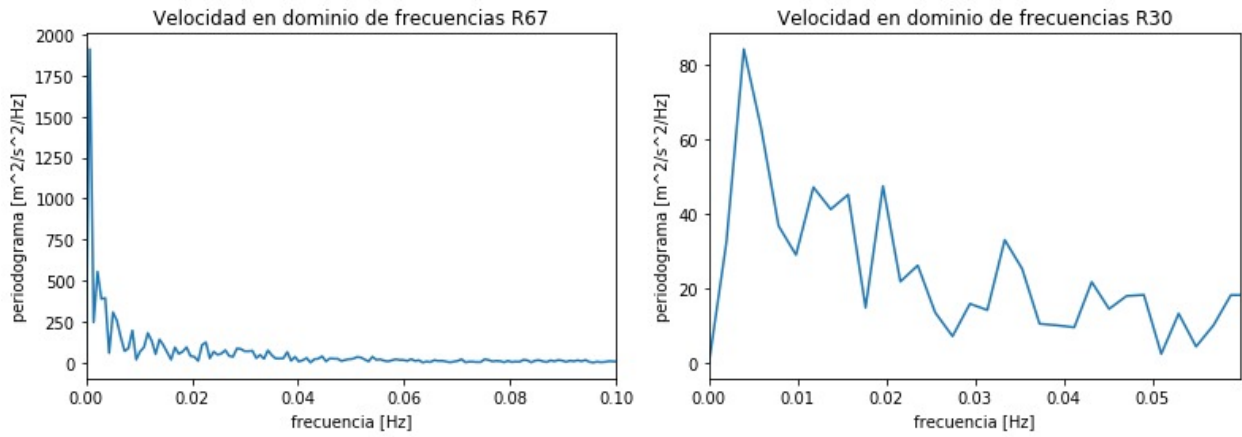


Figura 4.7: Periodogramas de velocidad: máximos y mínimos (Taxis)

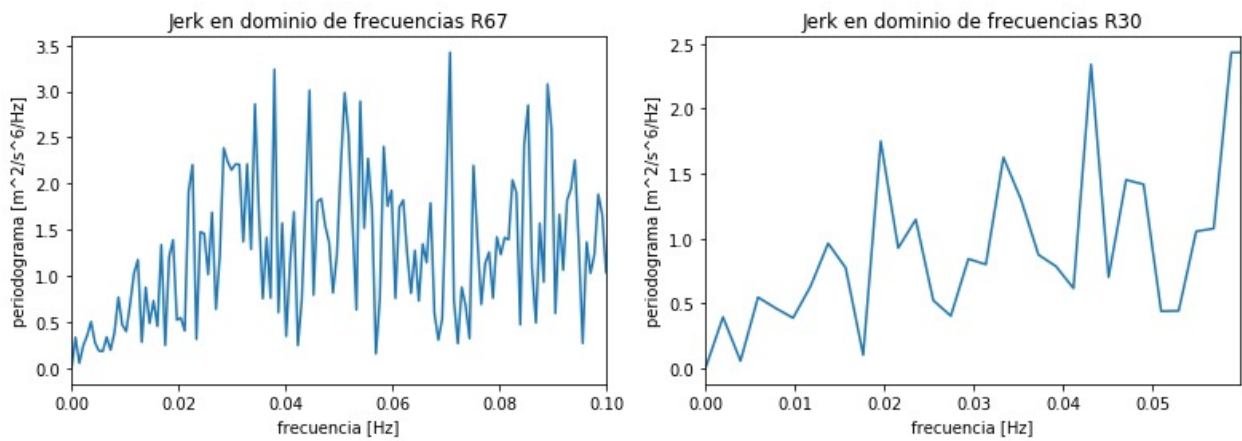


Figura 4.8: Periodogramas de jerk: máximos y mínimos (Taxis)

4.2.2. Buses

Tabla 4.3: Características máximos y mínimos: Buses

| | Máximo | Mínimo |
|--------------------------|-------------|---------------|
| Recorrido | 25 | 1 |
| RA0,9 | 0.667 | 0.429 |
| Hora de inicio y termino | 7:11 - 9:14 | 12:20 - 13:28 |
| Cantidad de datos | 73 | 35 |
| Distancia recorrida | 50.234 | 24.404 |
| Consumo energético | 47.23 | 42.558 |
| DA0,9 | 0.008 | 0.0022 |
| Desv vel | 20.499 | 22.438 |

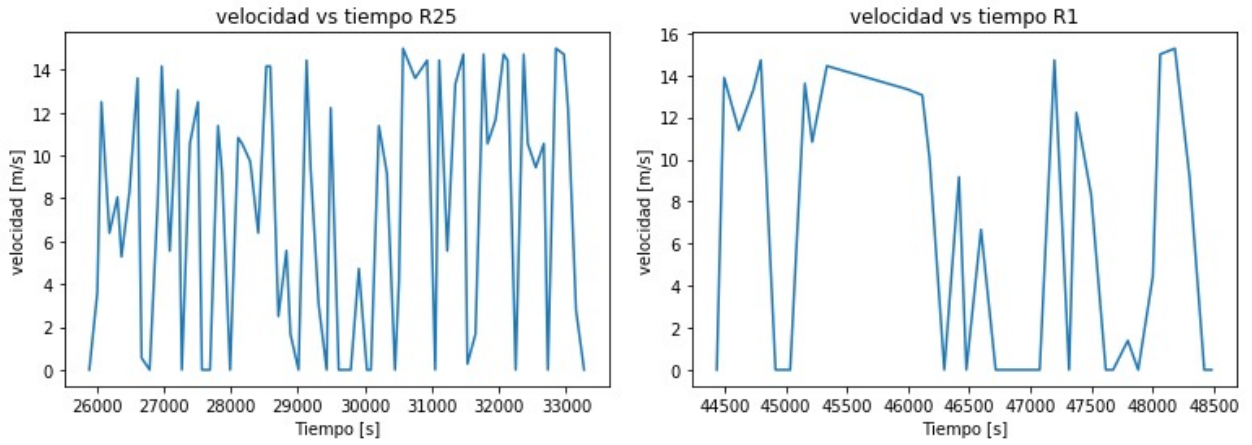


Figura 4.9: Velocidad vs tiempo: máximos y mínimos (Buses)

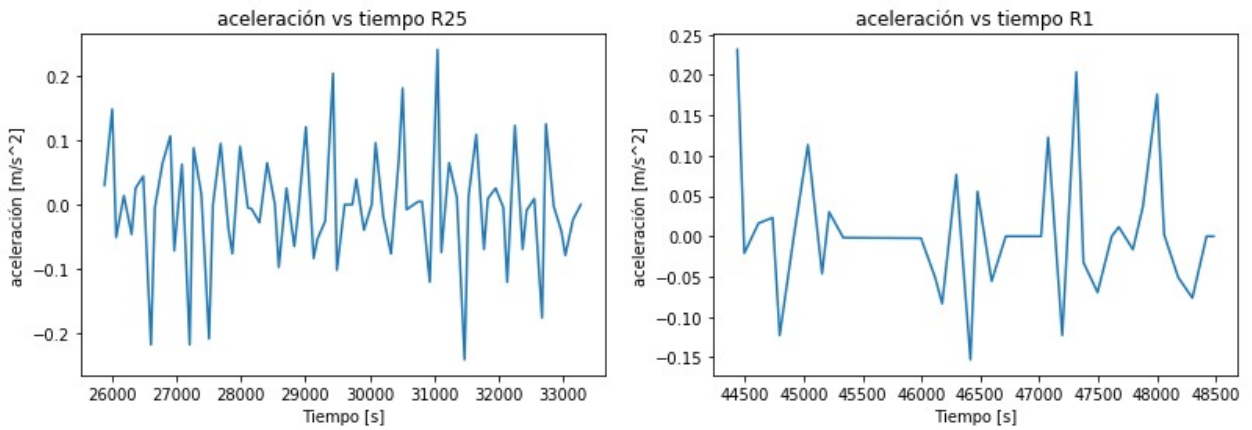


Figura 4.10: Aceleración vs tiempo: máximos y mínimos (Buses)

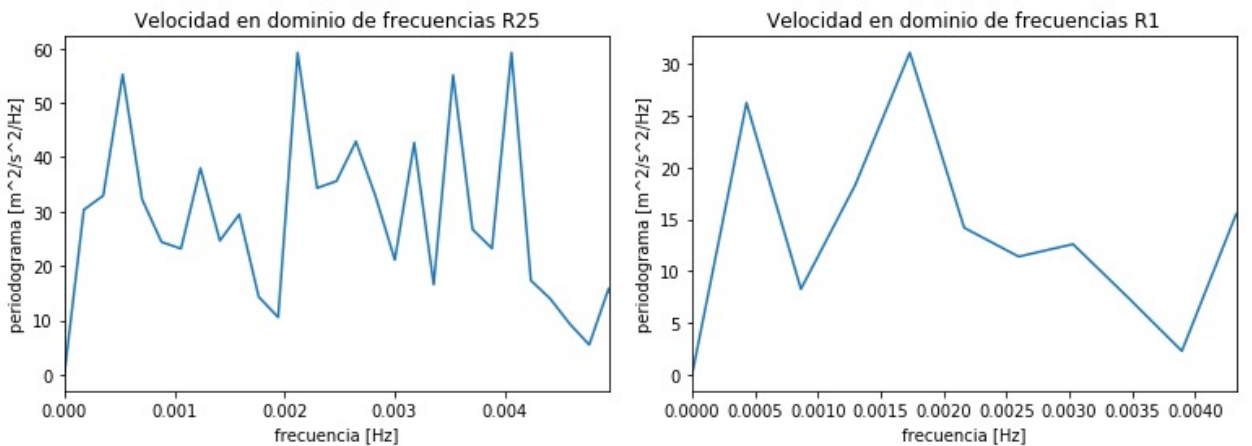


Figura 4.11: Periodogramas de velocidad: máximos y mínimos (Buses)

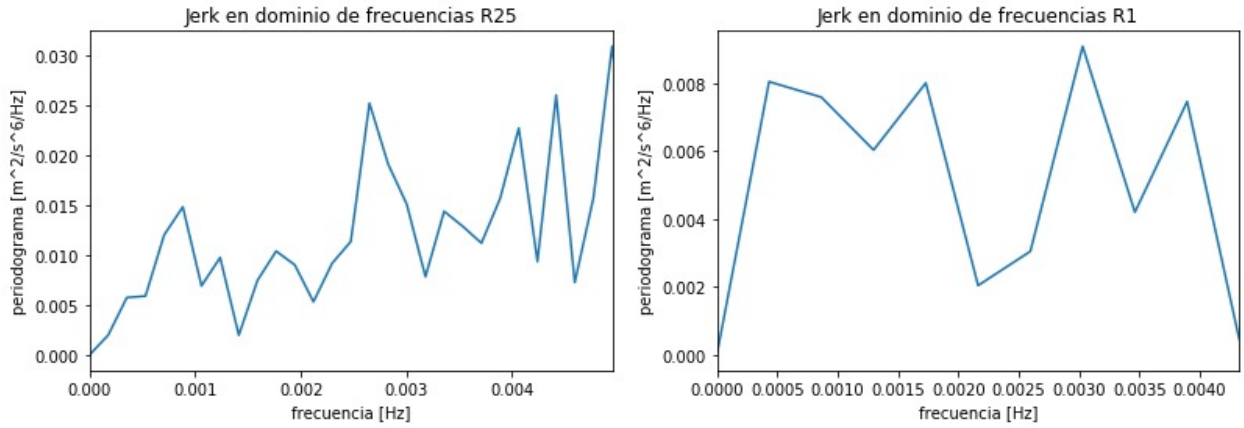


Figura 4.12: Periodogramas de jerk: máximos y mínimos (Buses)

4.3. Agresividad según características del viaje

Las figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 muestran el comportamiento de distintos parámetros de agresividad y el rendimiento ($[km/kWh]$) para distintas características del viaje. En cada figura se muestran las agresividades promedio en cada subcategoría y el error asociado a este promedio. En primer lugar, se muestran al estudiar los recorridos de acuerdo al horario, luego de acuerdo a la distancia y finalmente a la velocidad media. Para cada categoría se muestran primero los resultados correspondientes a los taxis y posteriormente a los buses.

4.3.1. Según horario

Taxi

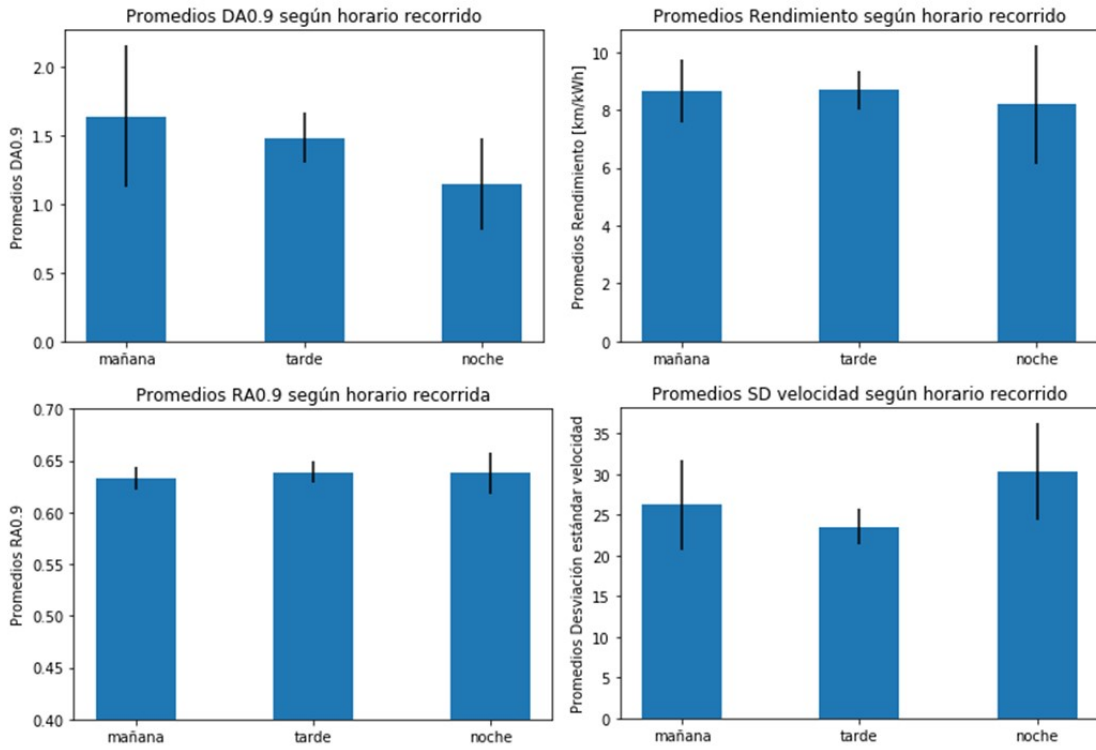


Figura 4.13: Agresividad según horario: Taxi

Buses

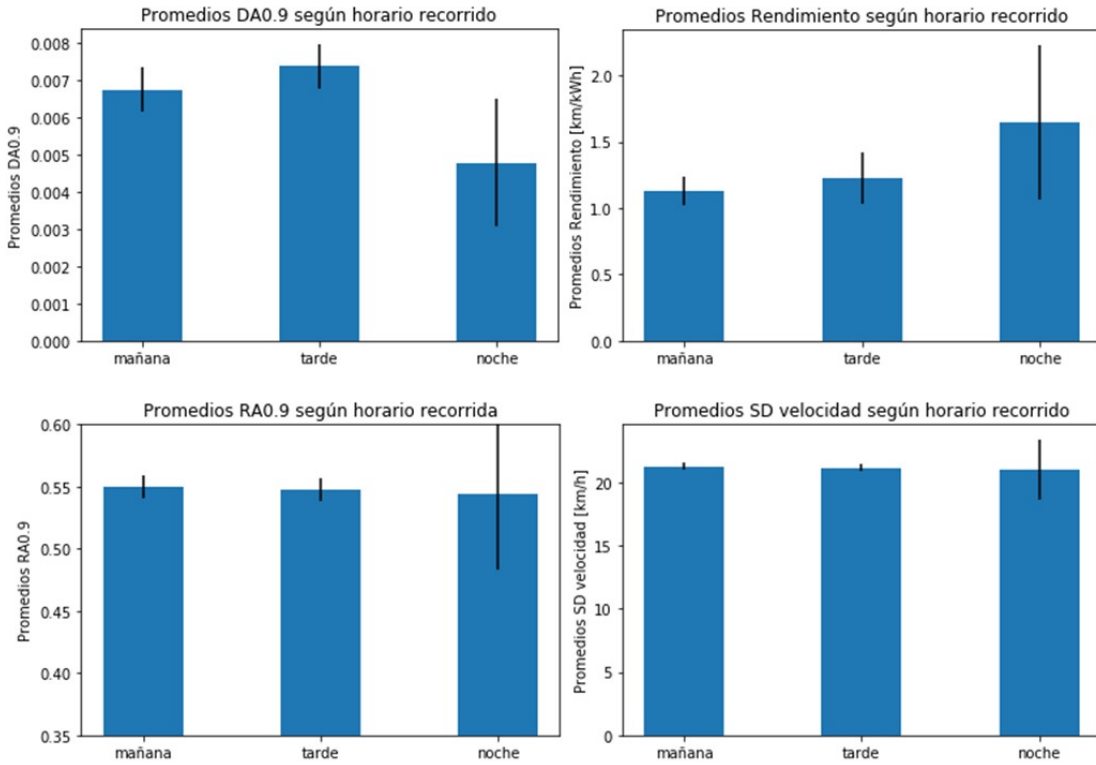


Figura 4.14: Agresividad según horario: Bus

4.3.2. Según distancia

Taxi

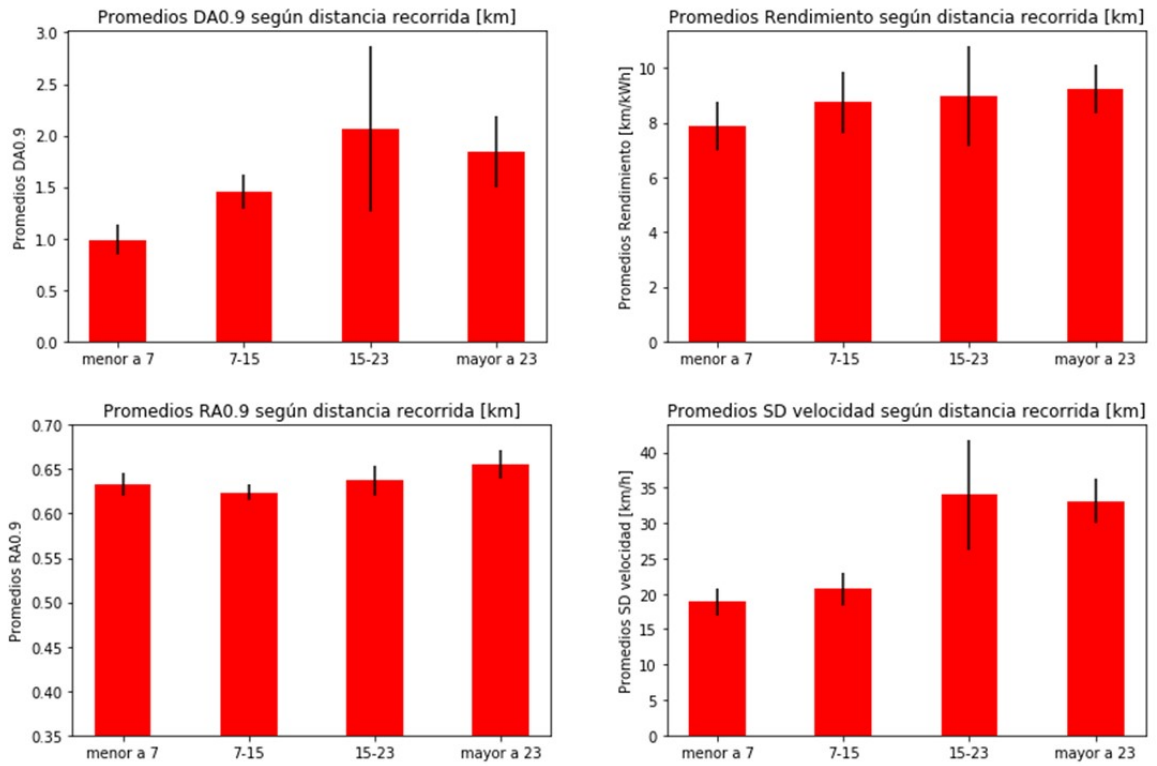


Figura 4.15: Agresividad según distancia: Taxi

Buses

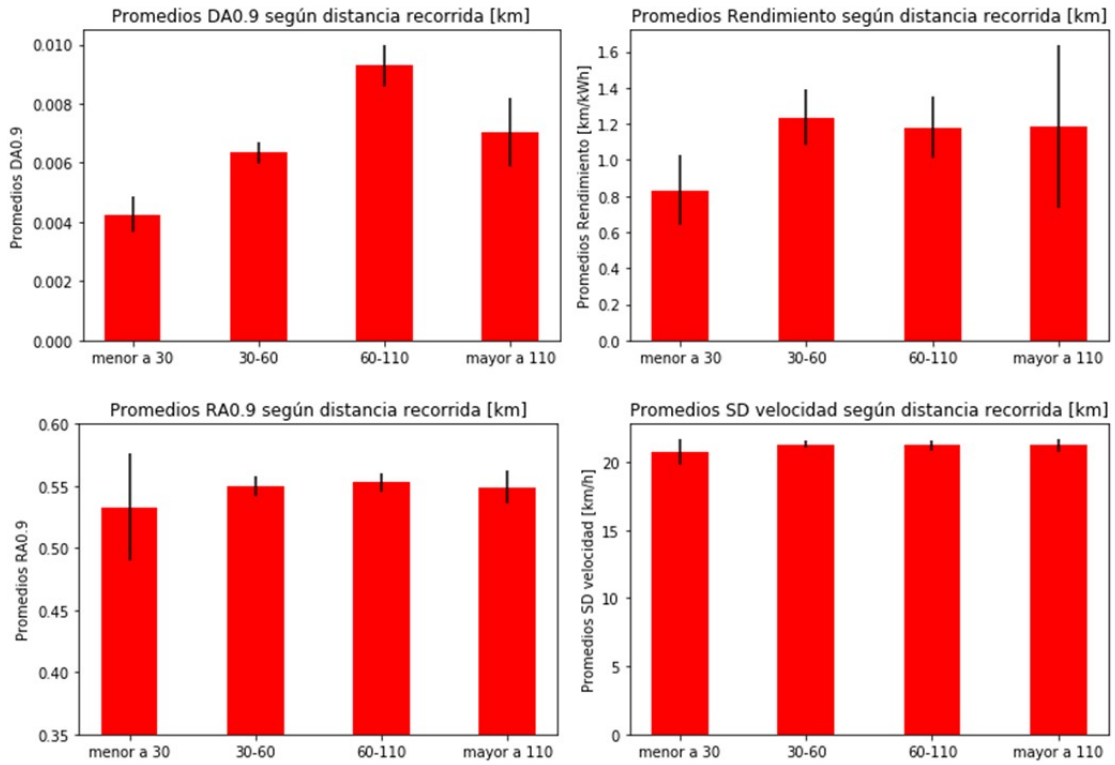


Figura 4.16: Agresividad según distancia: Bus

4.3.3. Según velocidad media

Taxi

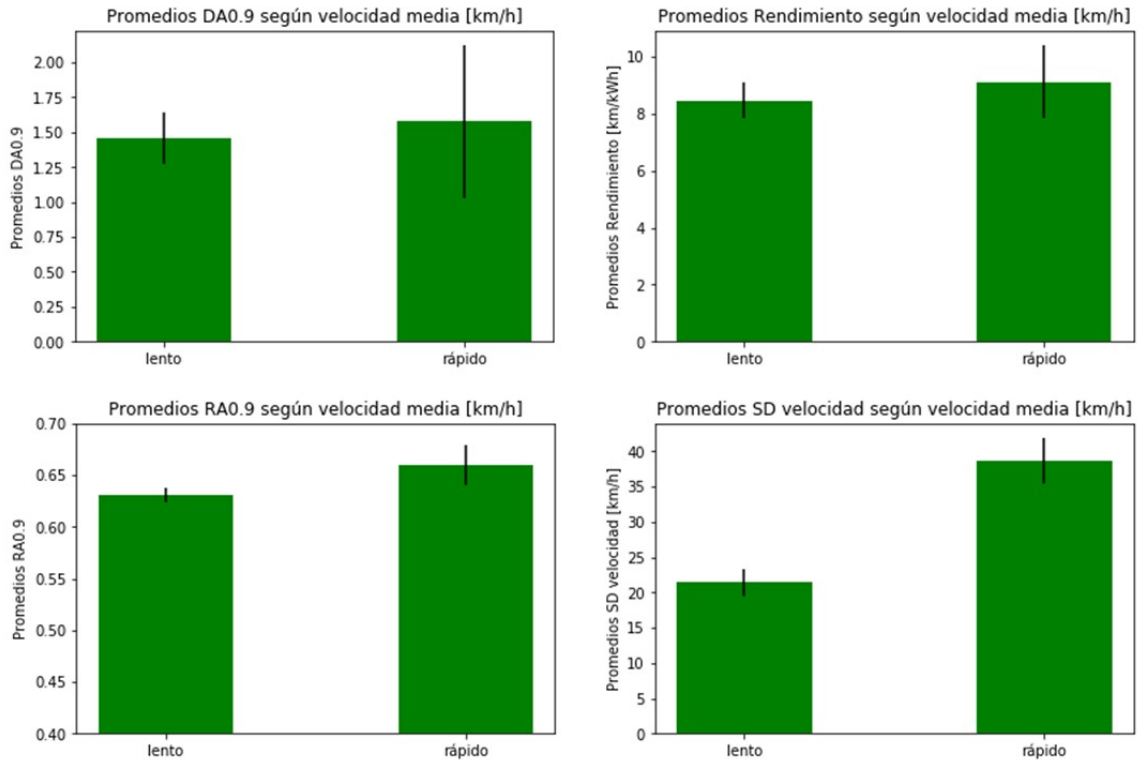


Figura 4.17: Agresividad según velocidad media: Taxi

Buses

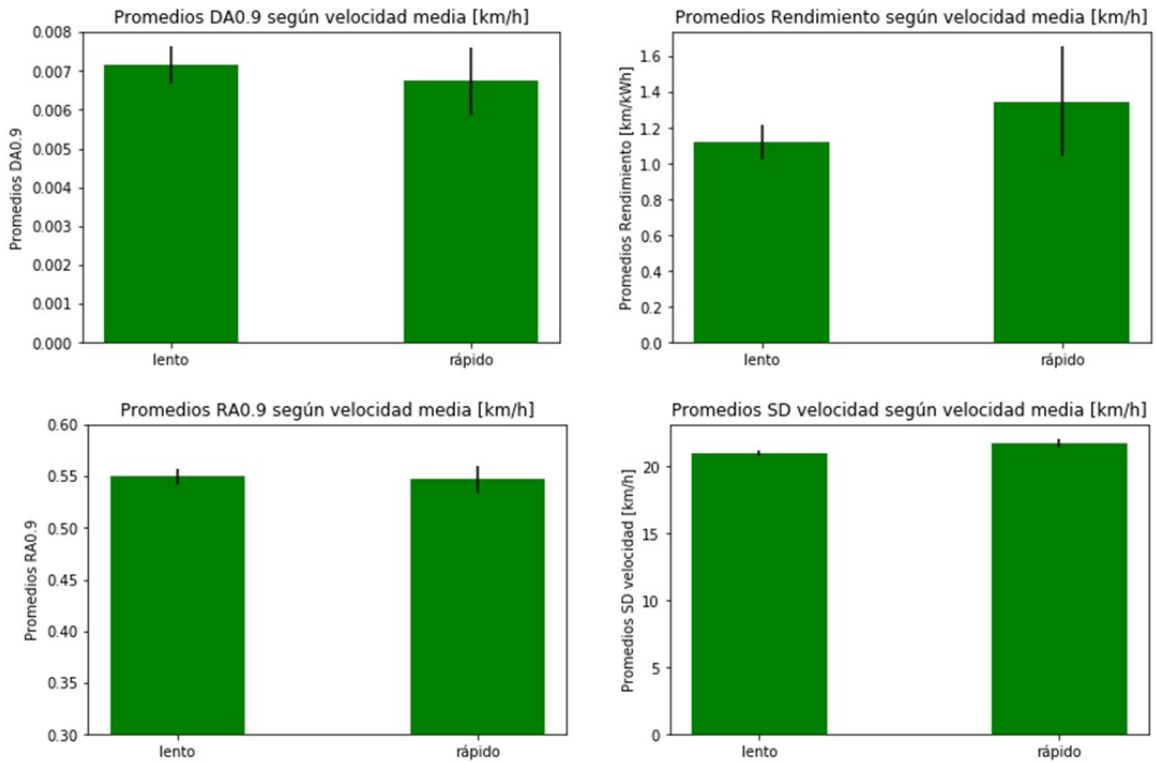


Figura 4.18: Agresividad según velocidad media: Bus

4.4. Recorridos similares

A continuación se presentan los resultados al estudiar recorridos que, mediante visualización gps, se observó que fueron similares. Para cada uno de los grupos se presenta un mapeo de los recorridos, en los cuales se puede corroborar la semejanza de la trayectoria y una tabla comparativa con los principales parámetros. Para el grupo 1 se muestra una comparación de los gráficos de: velocidad vs tiempo, aceleración vs tiempo, periodograma de la velocidad y periodograma del jerk. De esta forma se pueden comparar numéricamente y gráficamente los recorridos de cada grupo.

4.4.1. Grupo 1

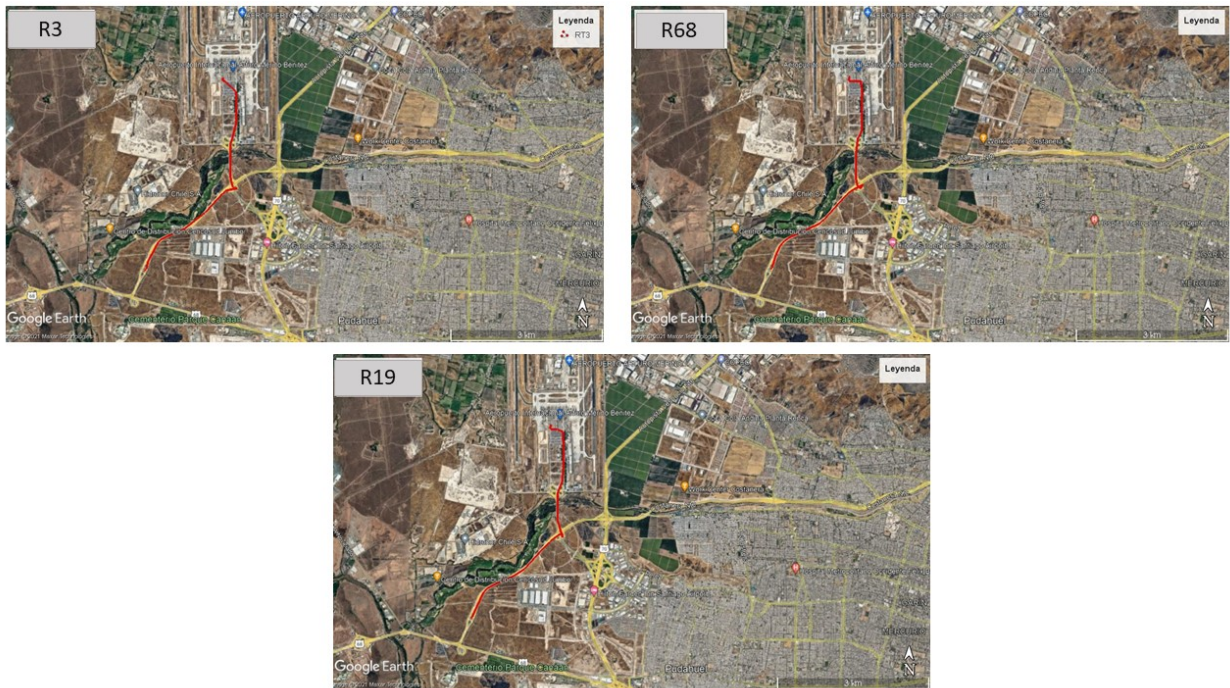


Figura 4.19: Mapa de los recorridos del grupo 1

Tabla 4.4: Características principales: Grupo 1

| Recorrido | RA0.90 | DA0.9 | Desviación estándar velocidad [km/h] | Rendimiento CE [km/kWh] | Rendimiento SOC [km/dsoc] | SOC inicial | Hora inicio | Hora fin |
|-----------|--------|-------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------|-------------|----------|
| R3 | 0.647 | 0.672 | 28.114 | 15.174 | 2.538 | 90 | 20:02 | 20:19 |
| R19 | 0.679 | 0.357 | 29.182 | 9.212 | 2.091 | 93 | 10:35 | 10:44 |
| R68 | 0.684 | 0.773 | 32.755 | 7.481 | 2.610 | 90 | 22:18 | 22:26 |

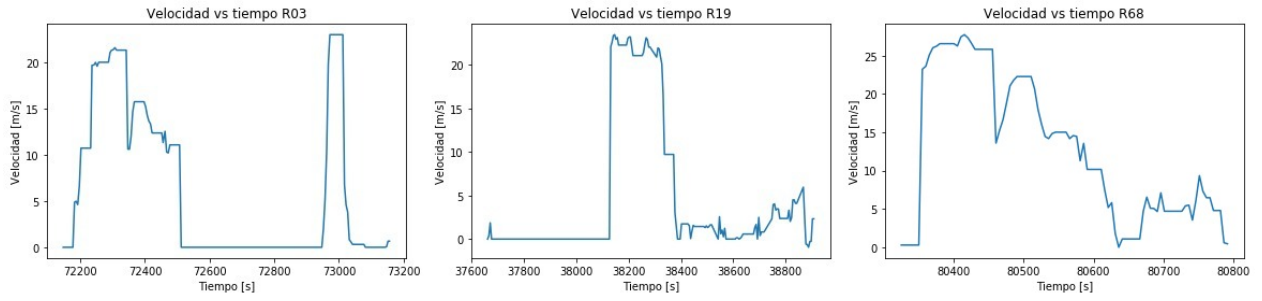


Figura 4.20: Velocidad vs tiempo: Grupo 1

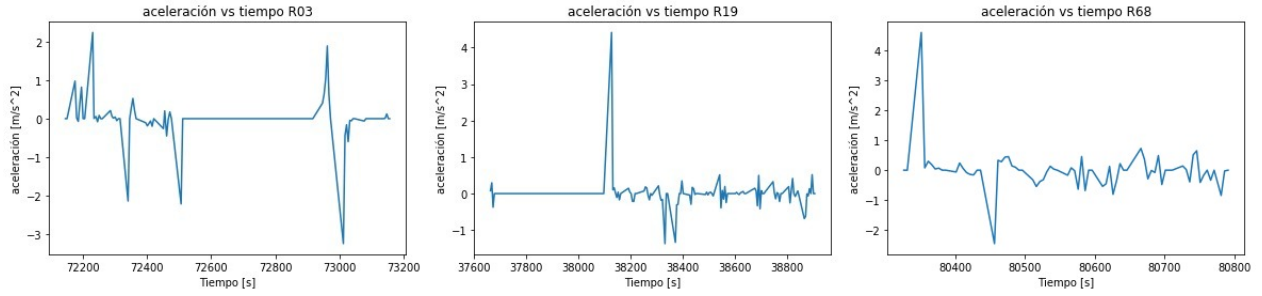


Figura 4.21: Aceleración vs tiempo: Grupo 1

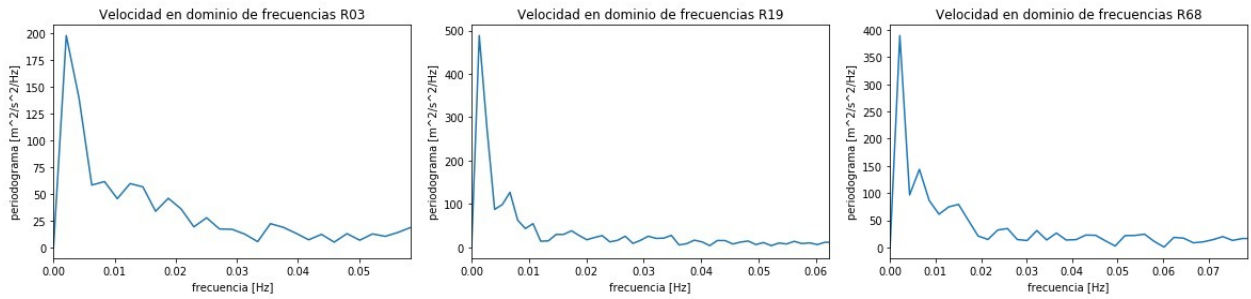


Figura 4.22: Periodograma de velocidad: Grupo 1

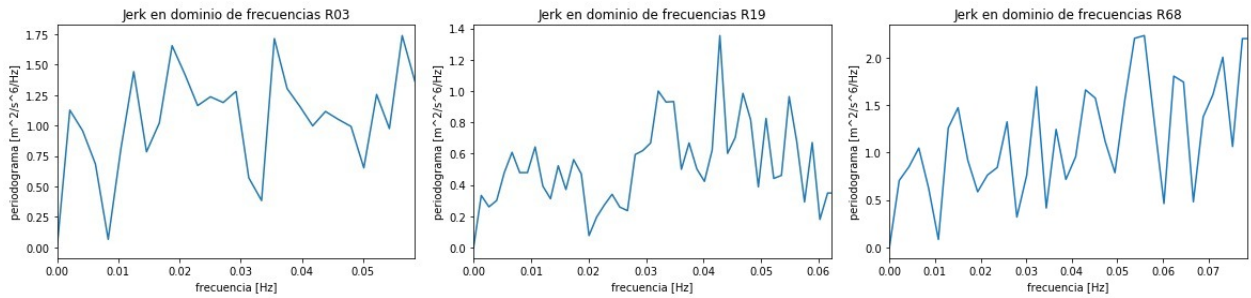


Figura 4.23: Periodograma de jerk: Grupo 1

4.4.2. Grupo 2

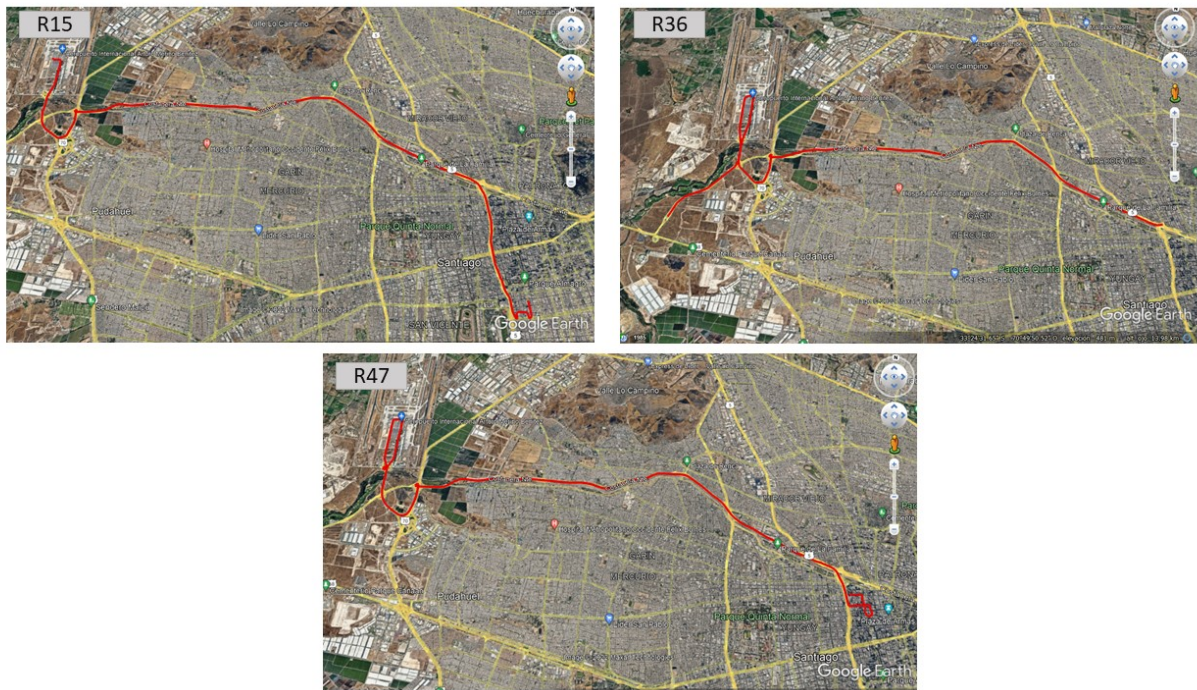


Figura 4.24: Mapa de los recorridos: Grupo 2

Tabla 4.5: Características principales: Grupo 2

| Recorrido | RA0.90 | DA0.9 | Desviación estándar velocidad [km/h] | Rendimiento [km/kWh] | Rendimiento 2 [km/dsoc] | SOC inicial | Hora inicio | Hora fin |
|------------|--------|-------|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|-------------|----------|
| R15 | 0.646 | 1.094 | 38.855 | 9.477 | 2.241 | 73 | 20:00 | 20:49 |
| R36 | 0.628 | 1.07 | 41.437 | 11.098 | 3.985 | 86.5 | 02:35 | 02:58 |
| R47 | 0.698 | 1.719 | 37.136 | 6.405 | 3.704 | 84.5 | 12:19 | 13:11 |

4.4.3. Grupo 3

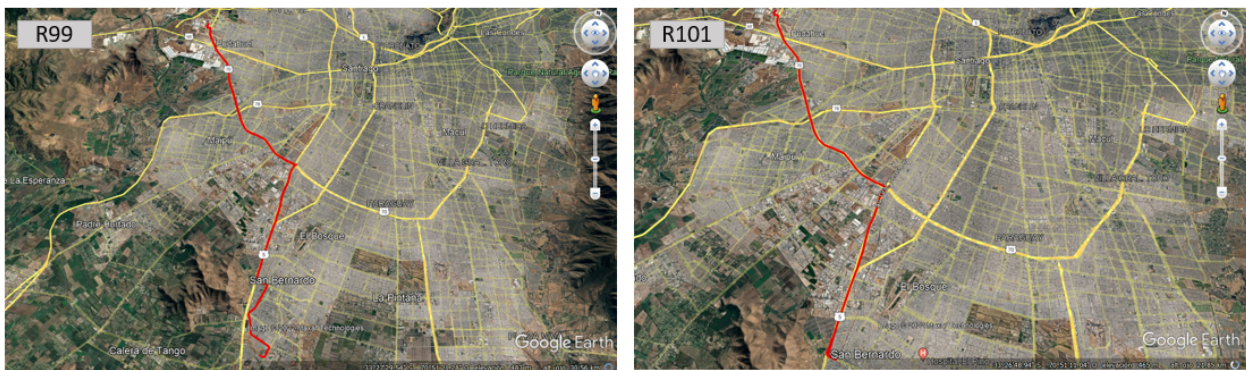


Figura 4.25: Mapeo de los recorridos: Grupo 3

Tabla 4.6: Características principales: Grupo 3

| Recorrido | RA0.90 | DA0.9 | Desviación estándar velocidad [km/h] | Rendimiento [km/kWh] | Rendimiento 2 [km/dsoc] | SOC inicial | Hora inicio | Hora fin |
|-------------|--------|-------|---|-------------------------|----------------------------|-------------|-------------|----------|
| R99 | 0.691 | 2.218 | 33.968 | 11.078 | 5.496 | 87.5 | 14:09 | 14:47 |
| R101 | 0.712 | 0.917 | 33.531 | 14.850 | 4.589 | 90 | 13:01 | 13:24 |

4.5. Agresividades similares

Con el fin de comprender porque a agresividades similares se obtienen diversos rendimientos (lo que se puede observar en las ilustraciones 4.1 y 4.3) es que se analizan grupos de recorridos con agresividades RA0.9 similares. A continuación, se muestran las características principales de los 4 grupos generados, estos grupos se generaron tal que exista un grupo con una agresividad superior a la media y otro inferior a la media para cada tipo de vehículo. La agresividad promedio para los buses fue de $RA0.9 = 0,549$ para los taxis fue de $RA0.9 = 0,637$. Para cada grupo se presenta una tabla con los principales parámetros de cada recorrido y también imágenes de las trayectorias que hizo el vehículo en cada viaje, se debe mencionar que para los buses solo se presentan los recorridos de un grupo ya que en esta imagen se puede notar que los recorridos de buses son siempre similares.

4.5.1. Grupo 4

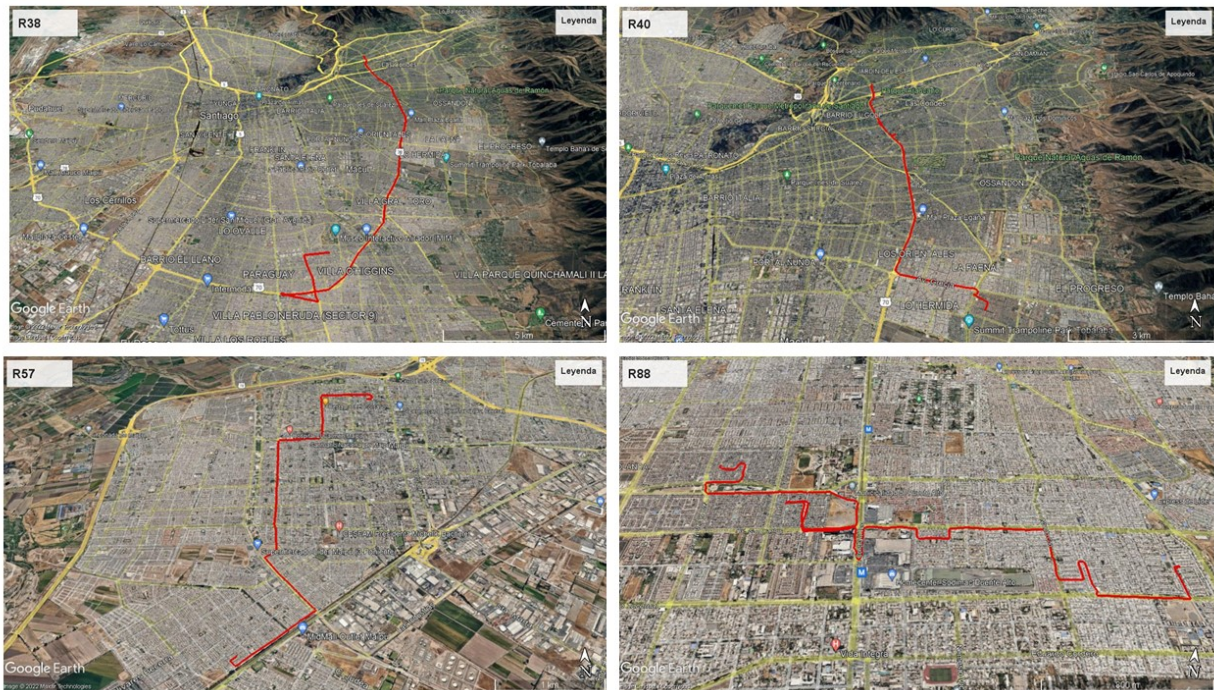


Figura 4.26: Mapeo de los recorridos: Grupo 4

Tabla 4.7: Características principales: Grupo 4

| Recorridos | n°38 | n°40 | n°57 | n°88 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| RA0.9 | 0,596 | 0,593 | 0,597 | 0,593 |
| km recorridos | 23,469 | 12,103 | 7,104 | 7,044 |
| Consumo energético (kWh) | 4,836 | 1,756 | 0,665 | 1,578 |
| Rendimiento (km/kWh) | 4,853 | 6,892 | 10,680 | 4,464 |
| Desv vel | 48,440 | 18,966 | 16,146 | 16,508 |
| DA0.9 | 1,844 | 0,99 | 1,412 | 1,540 |
| hora inicial | 1:36 | 14:58 | 16:52 | 13:30 |
| hora final | 1:59 | 15:29 | 17:14 | 14:05 |
| SOC inicial [%] | 31,5 | 60,5 | 62,5 | 64 |
| Rendimiento (km/dSOC) | 1,269 | 2,690 | 2,030 | 1,761 |
| velocidad media | 53,573 | 23,522 | 19,612 | 11,569 |

4.5.2. Grupo 5

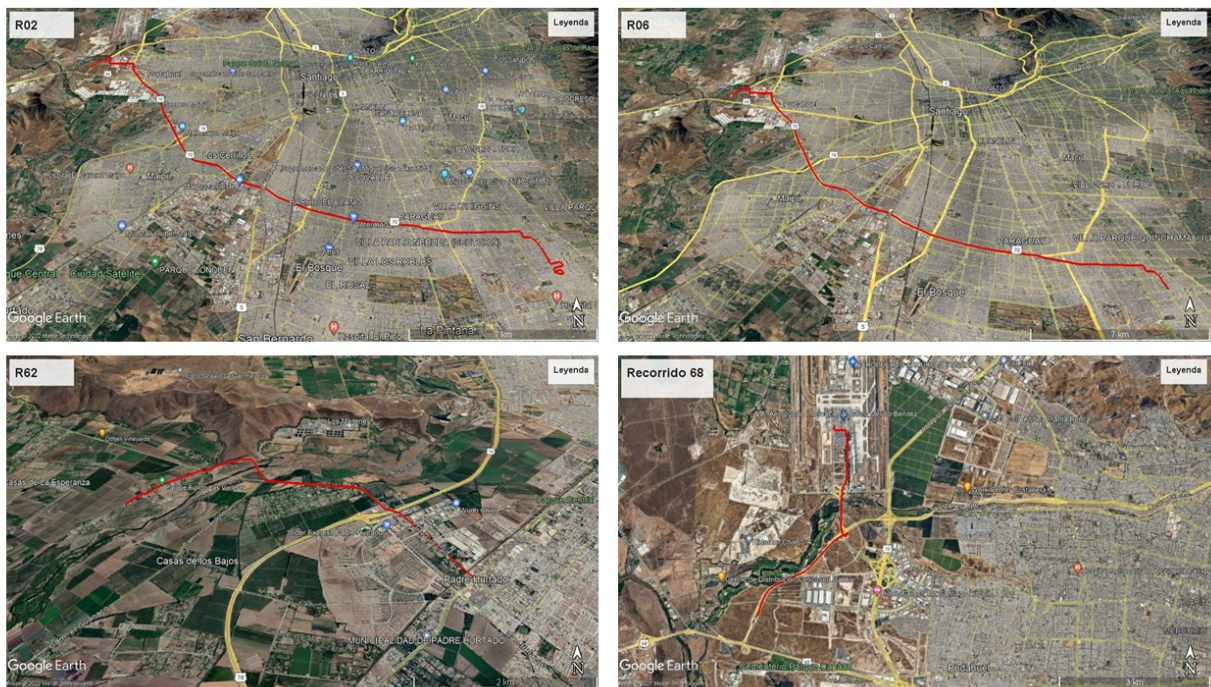


Figura 4.27: Mapeo de los recorridos: Grupo 5

Tabla 4.8: Características principales: Grupo 5

| Recorridos | n°2 | n°6 | n°62 | n°68 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| RA0.9 | 0,683 | 0,683 | 0,683 | 0,684 |
| km recorridos [km] | 32,618 | 29,737 | 6,650 | 5,220 |
| Consumo energético (kWh) | 2,751 | 2,857 | 0,829 | 0,698 |
| Rendimiento (km/kWh) | 11,858 | 10,407 | 8,023 | 7,481 |
| Desv vel [km/h] | 31,506 | 40,048 | 27,175 | 32,755 |
| DA0.9 | 1,718 | 1,272 | 1,033 | 0,773 |
| hora inicial | 17:25 | 19:29 | 15:43 | 22:18 |
| hora final | 18:44 | 20:03 | 15:57 | 22:26 |
| SOC inicial [%] | 69 | 74,5 | 69,5 | 90 |
| Rendimiento ([km/dSOC]) | 3,106 | 2,974 | 3,325 | 2,610 |
| velocidad media | 25,188 | 52,754 | 28,572 | 46,423 |

4.5.3. Grupo 6

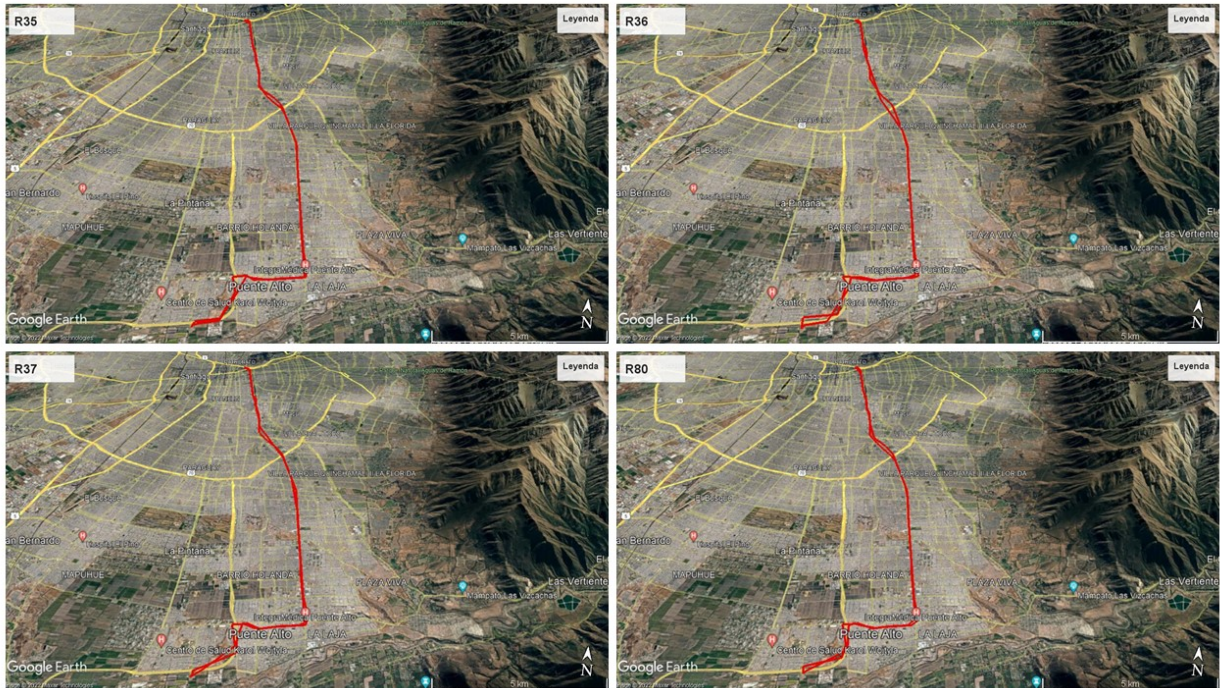


Figura 4.28: Mapeo de los recorridos: Grupo 6

Tabla 4.9: Características principales: Grupo 6

| Recorridos | n°35 | n°36 | n°37 | n°80 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| RA0.9 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | 0,526 |
| km recorridos | 52,075 | 52,168 | 52,075 | 52,217 |
| Consumo energético (kWh) | 24,516 | 15,447 | 66,887 | 67,693 |
| Rendimiento (km/kWh) | 2,124 | 3,377 | 0,779 | 0,771 |
| Desv vel | 20,291 | 20,953 | 19,365 | 20,812 |
| DA0.9 | 0,0062 | 0,0078 | 0,0059 | 0,0066 |
| hora inicial | 10:19 | 13:59 | 17:16 | 17:28 |
| hora final | 12:56 | 16:12 | 20:04 | 20:04 |
| SOC inicial [%] | 86,8 | 99,2 | 84,8 | 75,6 |
| Rendimiento (km/dSOC) | 3,719 | 3,622 | 3,616 | 3,626 |
| velocidad media | 22,462 | 25,169 | 17,935 | 22,956 |

4.5.4. Grupo 7

Tabla 4.10: Características principales: Grupo 7

| Recorridos | n°4 | n°12 | n°38 | n°76 | n°124 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RA0.9 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| km recorridos | 25,940 | 50,583 | 49,288 | 51,435 | 42,048 |
| Consumo energético (kWh) | 28,956 | 52,335 | 49,680 | 70,350 | 23,097 |
| Rendimiento (km/kWh) | 0,896 | 0,967 | 0,992 | 0,731 | 1,82 |
| Desv vel | 17,795 | 23,717 | 22,065 | 19,302 | 21,714 |
| DA0.9 | 0,0053 | 0,0058 | 0,0055 | 0,0061 | 0,01 |
| hora inicial | 18:28 | 7:14 | 12:19 | 7:06 | 16:32 |
| hora final | 19:41 | 9:25 | 14:18 | 9:47 | 18:24 |
| SOC inicial [%] | 82 | 99,6 | 84 | 99,6 | 78,8 |
| Rendimiento (km/dSOC) | 3,814 | 3,613 | 3,624 | 3,383 | 3,391 |
| velocidad media | 22,5 | 25,270 | 28,322 | 19,578 | 19,625 |

Capítulo 5

Análisis y Discusión

Los resultados presentados en la sección anterior permiten generar una discusión completa sobre el efecto que la agresividad del perfil de conducción genera en el consumo y la eficiencia energética de vehículos eléctricos. Se puede analizar también la validez de los distintos indicadores de agresividad estudiados.

En primer lugar, con respecto a los resultados presentados en la tabla 4.1, se puede observar que los taxis muestran tener un comportamiento más agresivo que los buses en todos los parámetros vistos, lo que se debe probablemente a la inercia del vehículo que permite que el taxi conduzca de forma más brusca, como el bus es más grande lleva mayor inercia lo que genera una conducción más suave.

El rendimiento promedio encontrado para los vehículos en ambos casos fue superior al esperado, pero la diferencia de rendimiento no se debe a la agresividad, sino que a las características propias de los vehículos y sus usos.

Es importante destacar que el Driver Aggressiveness no sirve para comparar entre distintos tipos de vehículos ya que está en una escala diferente. Esto se debe principalmente a la diferencia de masa de los vehículos y a la aceleración máxima que pueden tener, lo que influye en la escala del jerk. Los taxis, pueden alcanzar una aceleración de $2,863 \text{ m/s}^2$ mientras que los buses alcanzan una aceleración de $0,694 \text{ m/s}^2$, por lo tanto al multiplicar por el jerk promedio se genera una diferencia de escala. Esta diferencia de escalas también se puede observar en las figuras 4.8 y 4.12 donde el periodograma de los jerk de estos recorridos están en escalas diferentes, para los buses el jerk en el dominio de las frecuencias se encuentra entre 0 y 0,03, mientras que para los taxis se mueve entre 0 y 3,5. Por lo tanto el DA permite la comparación entre el mismo vehículo, pero no entre vehículos diferentes.

Gráficos de dispersión

Con respecto a los gráficos de dispersión presentados en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se busca ver la relación entre el rendimiento de los recorridos y la agresividad del perfil de conducción, en otras palabras, como se distribuye el rendimiento con respecto a la agresividad.

Como se observa en estas figuras, no hay ninguna relación directa entre agresividad y rendimiento. Se considera que existe relación cuando el factor de correlación R^2 es mayor o igual a 0,75, pero en este caso los factores de correlación son muy inferiores. El caso del Ripple aggressiveness en los taxis es el que muestra mayor correlación con solo un $R^2 = 0,1212$, en todos los otros casos el factor de correlación es menor a 0,1, por lo que no se tiene una relación directa entre agresividad y eficiencia energética.

La aparente falta de relación entre rendimiento y agresividad del perfil de conducción se debe a múltiples razones. En primer lugar, es importante recordar que, de acuerdo a los resultados presentados por Zifan Liu un perfil de conducción se considera agresivo cuando posee un $RA > 0,8$ lo que no se da en ninguno de los recorridos estudiados, ni para los taxis ni menos para los buses. Se puede inferir a partir de estos resultados que los perfiles de conducción (y por lo tanto el estilo de conducción de los conductores) estudiados es principalmente calmado o normal pero nunca agresivo, lo que probablemente se deba a que se trata de conductores profesionales que saben que una conducción calmada es conveniente para el vehículo.

Otro elemento que puede explicar la falta de relación entre el rendimiento y la agresividad es que el rendimiento depende de múltiples factores, y, al estudiar los recorridos de forma general no es posible identificar el nivel de influencia de cada factor. El rendimiento y el consumo energético dependerá, además de las características del conductor, de las características del camino, el tráfico en ese horario, el desnivel recorrido, el uso del aire acondicionado, entre otros. Por lo tanto, al estudiar los recorridos de forma general como se muestra en estos gráficos no se puede identificar cuanto influencia la agresividad por sobre los otros factores por lo que no es posible ver una relación entre la agresividad del perfil de conducción y el rendimiento, sin importar si este es medido por el consumo energético o por la diferencia del estado de carga durante el recorrido.

Con respecto a los gráficos que muestran la dispersión entre la agresividad y el rendimiento pero medido según la diferencia de SOC (figuras 4.2 y 4.4), es interesante notar que el rendimiento mejora con un SOC inicial alto, esto se ve especialmente en el caso de los taxis, donde los recorridos que comenzaron con un estado de carga entre el 100 % y el 80 % muestran un mejor rendimiento que aquellos que comenzaron con un estado de carga inferior a 80 %, en el caso de los buses esto no es tan notorio ya que la gran mayoría de los viajes comenzó con altos estados de carga (sobre 80 %). La baja de rendimiento con SOC bajos se debe principalmente al comportamiento propio de las baterías sumado, en menor medida, a una mayor ansiedad del conductor cuando el estado de carga es bajo.

Máximos y mínimos

El principal objetivo de mostrar como resultados las agresividades máximas y mínimas (medidas como RA) es poder visualizar gráficamente que representa cada uno de los parámetros de agresividad considerado, recordando que el RA y el DA buscan contar la cantidad de cambios bruscos de velocidad con respecto al total de cambios de velocidad y la desviación estándar de velocidad busca comparar el viaje con uno completamente “plano”.

Las figuras 4.5 y 4.9 muestran cómo fue variando la velocidad durante el recorrido que presentó la máxima agresividad y el recorrido que presentó la mínima agresividad tanto para buses como para taxis, medida en RA0,9. En estas se puede ver como el recorrido que muestra la mayor agresividad presenta una gran cantidad de cambios de aceleración y velocidad. En el caso de los taxis esto se ve influenciado por la cantidad de datos que son recogidos, ya que el mínimo muestra una frecuencia de toma de datos de 7 datos por minuto, mientras que el máximo de 12 datos por minuto, sin embargo, igual es observable como el recorrido más agresivo muestra una mayor cantidad de cambios de velocidad. En el caso de los buses también se observa gráficamente que el recorrido 25 posee una mayor cantidad de cambios

bruscos de velocidad y en este caso la toma de datos es similar (0,6 y 0,5 datos por minuto). Con respecto al gráfico de la aceleración en ambos casos esta se mueve en el mismo rango de valores y también se nota gráficamente que posee el recorrido más agresivo presenta mayor variación de datos.

Del periodograma de velocidad se observa que la frecuencia de corte, es decir, la frecuencia a la cual el área bajo la curva corresponde al 90% del total es similar entre el mínimo y el máximo, en el caso de los taxis la frecuencia de corte es 0,047 y 0,0489 respectivamente y en los buses de 0,0043 y 0,00406 respectivamente. Luego, la diferencia se encuentra en la cantidad de peaks que cada recorrido tiene superior a la frecuencia de corte, ya que las altas frecuencias representan las características del conductor mientras que las bajas frecuencias se ven influenciadas por las características del camino.

En las figuras 4.8 y 4.12 se muestran los jerk (o tirones) en el dominio de las frecuencias en el cual se puede ver cómo se calculó el RA, ya que se pueden ver los peaks sobre la frecuencia de corte y bajo esta. También se puede visualizar que el jerk promedio en el periodograma de los buses corresponde a números muy bajos (entre 0 y 0,03) y es por esto que al calcular el Driver aggressiveness (ecuación 2.5) da números muy chicos que no permiten comparar el DA entre taxis y buses.

Agresividad según características del viaje

Dado que con los gráficos de dispersión no se encontró una relación clara entre la agresividad del perfil de conducción y el rendimiento de un vehículo eléctrico, es que se dividieron los resultados según la característica del viaje con el fin de ver como varía la agresividad y el rendimiento en diferentes situaciones y si estas se relacionan con el rendimiento y el consumo energético.

Al observar los resultados según el horario del recorrido, se puede notar que no existe una distinción clara en el rendimiento ni en la agresividad entre los recorridos que se realizaron en la mañana, tarde y noche. En el caso de los buses, solo 2 recorridos fueron realizados de noche y el resto se hizo o en la mañana o en la tarde, en este vehículo se ve que el rendimiento y el DA aumentan en la tarde mientras que el RA y el Desv vel se mantienen constante, y, considerando el error asociado a estos promedios no se puede concluir con certeza que aumente la agresividad o el rendimiento en la tarde. En los taxis, la cantidad de recorridos en mañana, tarde y noche se distribuyó equitativamente y no se ve relación alguna entre el horario del recorrido y la agresividad o el rendimiento de este.

Con respecto a la segunda clasificación de los viajes, relacionada con la distancia recorrida, es importante resaltar que los buses realizan siempre el mismo recorrido el cual de ida se extiende por aproximadamente 25 km, por lo tanto, las cuatro subclasificaciones se refieren a realizar la ida o ida-vuelta o ida-vuelta-ida o ida-vuelta-ida-vuelta. En este sentido, nuevamente las agresividades no muestran diferencias entre las subclasificaciones, especialmente en el RA y la desviación estándar de la velocidad no se ven grandes variaciones a medida que se recorren más kilómetros. El Driver aggressiveness si muestra variaciones siendo mínimo en los recorridos cortos y máximo en los recorridos medios-largos, pero esto no se relaciona con la variación en el rendimiento.

En el caso de los taxis el DA muestra el mismo comportamiento que en el caso de los buses siendo mínimo en distancias cortas y máximo en distancias medias-largas al igual que

la desviación de la velocidad, pero el RA y el rendimiento no muestran cambios a medida que se recorren más kilómetros.

En el caso de los viajes de taxis clasificados según la velocidad media del recorrido, se observa un comportamiento similar para todos los parámetros. En todos, los casos la agresividad es superior para recorridos rápidos, que suelen estar relacionados con viajes por autopistas, y también pasa con el rendimiento, el rendimiento promedio de los viajes rápidos fue superior al rendimiento promedio de los viajes lentos. Sin embargo, el error asociado a estos promedios, especialmente para el caso del DA y el rendimiento, es tan grande que no permite concluir con certeza absoluta que el rendimiento y la agresividad es mayor en recorridos con altas velocidades (mayores a 40 km/h). Para los buses se repite la tendencia de que recorridos rápidos tienen mayor rendimiento, pero las agresividades no muestran diferencias considerables entre un recorrido rápido (mayores a 25 km/h) o uno lento.

Recorridos similares

Los grupos 1, 2 y 3 muestran cómo se relaciona la agresividad del perfil de conducción con el rendimiento analizando exclusivamente recorridos que hayan sido similares, de esta forma se pueden aislar otras variantes que afectan el rendimiento como la altura, o las características del camino para poder ver con mayor detalle cómo afecta la agresividad al consumo energético de vehículos eléctricos.

Para el primer grupo, se muestran tres recorridos que comienzan en el aeropuerto y finalizan en una gasolinera ubicada en la costanera norte, el segundo grupo de recorridos corresponde a tres viajes que comienzan en el aeropuerto y finalizan aproximadamente en la comuna de Providencia y el tercer grupo de recorridos corresponden a dos viajes que comienzan en el aeropuerto y finalizan en las cercanías de San Bernardo. Los 8 viajes estudiados en estos tres grupos, fueron viajes que recorrieron principalmente autopistas. Se debe destacar que todos los recorridos son realizados por taxis y no se consideran los buses en este análisis.

En la tabla 4.4, se puede ver que tanto para el RA como para la Desviación estándar de velocidad se tiene una relación negativa con el rendimiento basado en el consumo, es decir, a mayor agresividad, menor será el rendimiento. Mientras que el DA presenta una relación positiva con el rendimiento basado en el SOC. En el resto no se observa una relación clara.

En la tabla 4.5, nuevamente el RA muestra una relación negativa con el rendimiento basado en el consumo, al igual que el Driver aggressiveness. Para la Desv vel no se ve relación ni con el rendimiento basado en el SOC ni basado en consumo, además dada la diferencia de SOC inicial entre el recorrido 15 y los otros es que no es recomendable considerar el rendimiento basado en SOC en este caso.

En la tabla 4.6, se observa una relación negativa entre el DA y el rendimiento basado en consumo energético, lo mismo sucede con la Desv vel, para el rendimiento basado en SOC se muestra una relación positiva, donde a mayor agresividad mayor será el rendimiento. Para el Ripples aggressiveness se tiene exactamente lo contrario, relación negativa con el rendimiento 2 y relación positiva con el rendimiento basado en consumo energético.

A partir de estos resultados, se puede observar que en recorridos similares el RA tiende a mostrar una relación negativa con el rendimiento basado en consumo energético. Por lo

tanto, con el fin de disminuir el consumo energético es recomendable manejar de forma suave y evitar los cambios bruscos de velocidad. Sin embargo, esta aseveración no se puede asegurar completamente ya que no todos los casos mostraron esta relación, pero si fue lo más común.

La desviación estándar de la velocidad no muestra ser un parámetro muy adecuado para cuantificar la agresividad ya que al basarse en medias pierde mucha información de detalle del recorrido.

El Driver aggressiveness también mostró en la mayoría de los casos una relación negativa con el rendimiento, por lo que también induce a concluir que al observar recorridos similares la agresividad tiende a influir de forma negativa en el rendimiento de los vehículos eléctricos. Por lo tanto, con el fin de mejorar la eficiencia energética en la conducción es recomendable manejar de forma suave, evitando los cambios bruscos de velocidad, ya que se observa que en la mayoría de los casos esto generará un menor consumo energético.

Agresividades similares

En esta sección el objetivo fue determinar que factor afecta principalmente al rendimiento, dado que, si se tienen agresividades similares pero diferentes rendimientos, debe haber otro factor o factores que dominen al rendimiento. Se estudiaron 4 grupos tal que, tanto para taxis como para buses se estudien recorridos sobre y bajo la media de agresividad (medida como RA).

En el caso de los buses, la figura 4.28 muestra los recorridos del grupo 6, donde se puede ver que los viajes realizados por los buses son siempre muy similares, comenzando en la zona sur de Santiago y finalizando en el centro aproximadamente. Las tablas 4.9 y 4.10 muestran las características principales de los grupos seleccionados. En estas, se puede observar que un factor clave que influencia directamente al rendimiento es el horario en el que este se realiza, y el tráfico que en estos horarios haya. En el caso de los recorridos del grupo 6, los dos recorridos que mostraron peor rendimiento corresponden a aquellos que se realizaron en “horario punta” donde el tráfico es mayor. En el grupo 7, también se puede observar que 4 de los 5 recorridos mostraron peor rendimiento que la media mostrada por los buses y a excepción de uno, todos estos recorridos se hicieron en horario punta. por lo que se puede inferir que la principal influencia sobre el rendimiento para los buses corresponde al horario en el que este se realice y la cantidad de vehículos que haya en ese horario.

El efecto del horario, y del tráfico asociado, al rendimiento se debe principalmente a un consumo extra que se obtiene debido a los equipos auxiliares, especialmente debido a climatización. Esto genera que mientras más dure un recorrido, a pesar de ser la misma distancia, aumente el consumo energético. Como esto no se relaciona con las características de conducción, sería interesante y recomendable repetir la metodología empleada en este trabajo pero utilizando el rendimiento basado en la potencia mecánica en vez de la potencia eléctrica que se utilizó. Con esto no se considerarían los efectos de los consumos auxiliares como luces y aire acondicionado.

Es importante mencionar también que la hipótesis de que la agresividad del perfil de conducción tiene una relación negativa con el rendimiento se ve respaldada por estos resultados, pero solo en el caso de los buses (tablas 4.9 y 4.10) dado que el rendimiento medio del grupo 7 es de 1,0812 y en el grupo 6 es de 1,762 y la agresividad del grupo 6 es considerablemente menor que en el grupo 7. En cambio, en el caso de los taxis, el grupo que muestra mayores agresividades muestra también mayores rendimientos.

En el caso de los taxis, es más difícil poder encontrar un factor que se muestre dominante para influir en el rendimiento de un recorrido. Las figuras 4.26 y 4.27 muestran que los recorridos de los taxis difieren mucho entre ellos, van desde y hacia distintas comunas, algunos recorren principalmente calles (ej. R88) mientras que otros lo hacen principalmente por autopistas (ej. R06), en duración también difieren y en longitud recorrida. Es por esto que se puede deducir que un recorrido posee múltiples características y factores que influenciarán en el rendimiento del vehículo, desde las características del camino como calidad de pavimento y desnivel recorrido, características del vehículo y usos (como el aire acondicionado) y también las características del conductor. Al analizar datos reales de operación se dificulta la oportunidad de aislar estos factores para poder analizarlos individualmente por lo que no es posible concluir con certeza, claridad y de forma cuantificada el efecto que cada uno de estos factores tendrá en el rendimiento final.

Frecuencia de muestro óptima

Una discusión necesaria de realizar al trabajar con datos reales de operación corresponde a cuestionarse si la calidad de los datos tomados es suficientemente buena y si la frecuencia muestreo sirve para el propósito del estudio. En este caso los datos de los taxis fueron tomados cada 5 a 8 segundos mientras que para los buses los datos se obtuvieron cada 1 o 2 minutos.

Se puede determinar si la frecuencia de muestreo es suficiente, a través de las aceleraciones máximas que tienen los vehículos. En el caso de los taxis estos aumentan su velocidad de 0 a 100 km/h en 9.7 segundos (aceleración máxima de $2,863 \text{ m/s}^2$), mientras que los buses aumentan su velocidad de 0 a 50 km/h en 20 segundos (aceleración máxima de $0,6944 \text{ m/s}^2$) [24].

Si se considera un caso extremo de un recorrido en el que se acelere al máximo hasta cierta velocidad y luego se frene hasta llegar a una velocidad nula, se requiere de una frecuencia de muestreo tal que satisfaga la ecuación 5.1, de esta forma se podrá describir de forma correcta el recorrido estudiado, más detalles sobre esta ecuación se pueden encontrar en el anexo D.

$$f = \frac{1}{t_i} \quad t_i = \frac{v_i}{a_{max}} \quad (5.1)$$

A partir de esta ecuación y considerando que los buses suelen viajar a velocidades entre 20-50 km/h es que las frecuencias de muestreo óptimas para los buses sería entre 0,0416 a 0,125 Hz, es decir, desde 1 dato cada 8 segundos a 1 dato cada 24 segundos. En cambio para, los taxis que suelen viajar a velocidades entre 20-100 km/h la frecuencia de muestro óptima esta entre 0,1 y 0,5 Hz, es decir, desde 1 dato cada 2 segundos a 1 dato cada 10 segundos.

Si bien esta discusión se realiza de forma general y omite elementos relevantes como la masa del vehículo, permite generar nociones sobre la calidad de los datos adquiridos. En este sentido se observa que los datos adquiridos para los taxis se encuentran dentro del rango óptimo de frecuencia, y permitirían describir incluso el peor escenario posible de recorrido. En cambio, en el caso de los buses la frecuencia de toma de datos no se encuentra dentro del rango por lo que es recomendable mejorar la adquisición de información.

Capítulo 6

Conclusiones

A modo de conclusión, se debe destacar el cumplimiento de los objetivos de este estudio que buscaba determinar el efecto de la agresividad del perfil de conducción en el consumo energético de vehículos eléctricos. Para esto se logró cuantificar la agresividad mediante tres parámetros diferentes en 89 recorridos de taxis y 115 recorridos de buses, se destaca que los taxis presentan en promedio mayores agresividades en la conducción que los buses. Se logró también cuantificar el consumo energético y el rendimiento de cada uno los recorridos. Luego se analizó la relación entre la agresividad encontrada y el rendimiento. Primero desde un enfoque general viendo si existe una relación observando todos los recorridos, luego de forma particular y más específica dividiendo los recorridos según categorías y analizando recorridos similares y otros con agresividades similares.

El modelo en el cual se basó este estudio para cuantificar la agresividad plantea que con un RA mayor a 0,8 la conducción se considera agresiva y se ven mayores efectos en el consumo energético. Los resultados encontrados en el presente estudio muestran que la conducción fue siempre calmada o normal, pero nunca del nivel agresivo, por lo que se destaca el estilo de conducción de los conductores estudiados dado que su agresividad es muy baja lo que ayuda a un buen rendimiento de los vehículos. El bajo nivel de agresividad encontrado dificulta poder observar de forma directa una relación entre la agresividad y el rendimiento.

Con respecto al indicador *Driver Aggressiveness* propuesto por Zifan Liu, se concluye que no sirve para comparar diferentes vehículos dado que, al poseer masas tan diferentes, tendrán inercias muy dispares y esto generará que cambiar la aceleración sea más difícil para los buses. Por lo tanto, los jerk están en una escala diferente, lo que genera que el DA también lo esté. Luego, no es posible comparar bajo este parámetro buses y taxis, ni los vehículos analizados en este estudio con los utilizados por Liu.

Al observar los gráficos de dispersión, se puede notar que los factores de correlación son muy bajos lo que quiere decir que no existe una relación clara entre la agresividad en la conducción y el rendimiento de un vehículo eléctrico. Sin embargo, al estudiar recorridos similares se puede notar que en la mayoría de los casos, una mayor agresividad implica un peor rendimiento y viceversa. Por lo tanto, se puede inferir que la agresividad del perfil de conducción tiende a poseer una relación negativa con el rendimiento y el consumo energético de vehículos eléctricos. Esta relación negativa entre la agresividad y el rendimiento se observa para dos parámetros: RA y DA, los cuales miden la cantidad de cambios bruscos de velocidad con respecto al total de cambios de velocidad.

La desviación estándar de velocidad, al ser un parámetro que toma aspectos generales y omite el detalle del recorrido no muestra ser un buen indicador de agresividad.

Finalmente, se concluye que el rendimiento en vehículos eléctricos depende de múltiples factores, algunos externos al conductor como la calidad del camino, la pendiente de este y el tráfico en las calles y otros relacionados al estilo de cada conductor. En el caso de los vehículos eléctricos esto también se ve reforzado por el uso del freno regenerativo que permite recuperar energía que en un vehículo convencional se pierde en el freno. Al estudiar datos reales de operación, todos estos factores influyen en el rendimiento lo que hace que sea muy difícil poder aislar los factores para analizar solo uno. En el caso de los buses, los resultados muestran que el tráfico tiene un fuerte impacto en el rendimiento. En el caso de los taxis no es tan notorio, por lo que para mejorar la eficiencia energética en la conducción se debe manejar de forma menos agresiva pero también considerar los otros factores.

6.1. Recomendaciones y trabajo futuro

Con el fin de mejorar, completar y perfeccionar el estudio del efecto de la agresividad del perfil de conducción en la eficiencia energética de vehículos eléctricos se proponen los siguientes puntos:

1. Aumentar la cantidad de recorridos y la cantidad de conductores considerados. En el presente estudio se analizaron solo conductores de taxis y de buses los cuales tienen mayor experiencia y profesionalismo. Sería interesante extender el estudio a conductores menos capacitados, para ver cuan agresivo es su estilo de conducción y cómo afecta al rendimiento. Aumentar la cantidad de recorridos permitiría asegurar que la muestra es correcta.
2. Tomar datos con una mayor frecuencia de muestro. Dado que los principales indicadores de agresividad utilizados miden la cantidad de cambios bruscos de velocidad, es necesario tomar los datos con una mayor frecuencia, especialmente para el caso de los buses. En los buses, la frecuencia de muestreo en general fue de 1 dato por minuto, y dada su aceleración máxima en este tiempo alcanza a acelerar hasta 50 km/h y luego frenar, información que sería perdida. Aumentar la calidad de toma de datos permitiría una mayor confiabilidad en los resultados.
3. Se recomienda repetir la metodología utilizada en este estudio, pero utilizando la potencia mecánica en vez de la potencia eléctrica para determinar el consumo energético y el rendimiento. Si bien la potencia eléctrica muestra el consumo final que debe ser satisfecho por el usuario, al utilizar la potencia mecánica se estudian exclusivamente factores del perfil de conducción y no los efectos de los equipos auxiliares.
4. Finalmente, se recomienda continuar y extender los estudios relacionados a los vehículos eléctricos ya que estos juegan un rol muy importante en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para que la transición tecnológica se lleve a cabo de buena forma se debe comprender muy bien como estos funcionan, por lo que estudios como este son muy valiosos y se deben continuar haciendo.

Bibliografía

- [1] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), “Comunicado de prensa del ipcc.”, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf.
- [2] Ministerio de Energía, “Estrategia nacional de electromovilidad 2021.”, https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_electromovilidad_2021_0.pdf.
- [3] International Energy Agency, “Global ev outlook 2021 – analysis.”, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> (visitado el 2022-03).
- [4] Montoya, A., “Electromovilidad en Chile 2020.”, <https://www.avec.cl/wp-content/uploads/2021/03/Electromovilidad-en-Chile-2020.pdf>.
- [5] International Energy Agency, “Data overview.”,
- [6] Ministerio de Energía, “Balance nacional de energía 2019.”, https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/2020_informe_anual_bne_2019.pdf.
- [7] Ministerio del Medio Ambiente, “Inventario nacional de gases de efecto invernadero.”, <https://snichile.mma.gob.cl/principales-resultados/sector-energia/> (visitado el 2022-03).
- [8] Ministerio de Energía, “Balance nacional de energía – energía abierta | comisión nacional de energía.”, <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>.
- [9] Ministerio de Energía, “Plataforma de electromovilidad - beneficios de la electromovilidad.”, <https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion/beneficios-de-la-electromovilidad>.
- [10] Ministerio de energía, “Plataforma de electromovilidad - infografías.”, <https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias?info=24>.
- [11] developed: Cristian Cartes Arce | Grupo editorial Editec spa, “El rol de la electrónica de potencia en la electromovilidad - tecnología.”, <https://www.electromov.cl/2019/10/08/el-rol-de-la-electronica-de-potencia-en-la-electromovilidad/>.
- [12] ev database, “Hyundai ioniq electric.”, <https://ev-database.org/car/1165/Hyundai-IONIQ-Electric> (visitado el 2022-03).
- [13] Ministerio de Energía, “Plataforma de electromovilidad - buses eléctricos de red metropolitana de movilidad.”, <https://energia.gob.cl/electromovilidad/transporte-de-pasajeros/buses-electricos-red>.
- [14] BYD, “Bus eléctrico k9fe.”, <http://www.bydchile.com/images/K9FE.pdf>.
- [15] Centro de Energía FCFM y Ministerio de Energía, “Informe proyecto ruta sustentable.”

- [16] Liu, Z., Ivanco, A., y Filipi, Z., “Quantification of drive cycle’s rapid speed fluctuations using fourier analysis,” pp. 170–177, doi:10.4271/2015-01-1213.
- [17] Liu, Z., “Battery aging studies based on real-world driving.”, https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/1921.
- [18] Bingham, C., Walsh, C., y Carroll, S., “Impact of driving characteristics on electric vehicle energy consumption and range,” vol. 6, no. 1, p. 29, doi:10.1049/iet-its.2010.0137.
- [19] Alvarez, R., López, A., y De la Torre, N., “Evaluating the effect of a driver’s behaviour on the range of a battery electric vehicle,” vol. 229, no. 10, pp. 1379–1391, doi:10.1177/0954407014561483.
- [20] Fernandes, P., Tomás, R., Ferreira, E., Bahmankhah, B., y Coelho, M., “Driving aggressiveness in hybrid electric vehicles: Assessing the impact of driving volatility on emission rates,” vol. 284, p. 116250, doi:10.1016/j.apenergy.2020.116250.
- [21] Carbacho, D., “Análisis del desempeño de un vehículo eléctrico sometido a diversas condiciones en la zona central y sur de Chile.”, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176194>.
- [22] Schneider, A., “Gps visualizer.”, <https://www.gpsvisualizer.com/>.
- [23] “Google earth.”, <https://www.google.com/intl/es/earth/>.
- [24] tok.wiki, “Byd k9 especificaciones políticas.”, https://hmong.es/wiki/BYD_K9 (visitado el 2022-04-20).

Anexos

Anexo A. Ficha técnica Hyundai ioniq

Metric

Search...



MOST RECENT CHEAPEST EV TOWING FASTCHARGING MOST EFFICIENT LONGEST RANGE

Hyundai IONIQ Electric

Battery Electric Vehicle



38.3 kWh
Useable Battery



250 km
Real Range



153 Wh/km
Efficiency

Price

| | |
|------------------------|---------|
| <u>United Kingdom</u> | £33,050 |
| <u>The Netherlands</u> | €37,015 |
| <u>Germany</u> | €35,350 |

Availability

| | |
|------------------------|---------------|
| <u>United Kingdom</u> | In production |
| <u>The Netherlands</u> | In production |
| <u>Germany</u> | In production |

Prices shown are recommended retail prices for the specified countries and do not include any indirect incentives. Pricing for the UK includes the direct incentive of the "Plug-In Car Grant (PICG)". Pricing and included options can differ by region and do not include any indirect incentives. Click on a country for more details.

Real Range**between 175 - 365 km**

| | | | |
|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| City - Cold Weather | 235 km | City - Mild Weather | 365 km |
| Highway - Cold Weather | 175 km | Highway - Mild Weather | 230 km |
| Combined - Cold Weather | 205 km | Combined - Mild Weather | 290 km |

Indication of real-world range in several situations. Cold weather: 'worst-case' based on -10°C and use of heating. Mild weather: 'best-case' based on 23°C and no use of A/C. The actual range will depend on speed, style of driving, weather and route conditions.

(Advertisement)

Performance

| | | | |
|---------------------------|----------|--------------|-----------------|
| Acceleration 0 - 100 km/h | 9.7 sec | Total Power | 100 kW (136 PS) |
| Top Speed | 165 km/h | Total Torque | 295 Nm |
| Electric Range | 250 km | Drive | Front |

Battery and Charging

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------|----------|
| Battery Capacity * | 40.4 kWh | Battery Useable | 38.3 kWh |
|--------------------|----------|-----------------|----------|

Europe

| | | | |
|-------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
| Charge Port | Type 2 | Fastcharge Port | CCS |
| Port Location | Left Side - Rear | FC Port Location | Left Side - Rear |
| Charge Power | 7.2 kW AC | Fastcharge Power (max) | 44 kW DC |
| Charge Time (0->250 km) | 6h15m | Fastcharge Time (25->200 km) | 47 min |
| Charge Speed | 40 km/h | Fastcharge Speed | 220 km/h |

[Click here for all charging information](#)

Energy Consumption

EVDB Real Range

| | | | |
|---------------------|-----------|-------------------------|-------------|
| Range | 250 km | CO2 Emissions | 0 g/km |
| Vehicle Consumption | 153 Wh/km | Vehicle Fuel Equivalent | 1.7 l/100km |

WLTP Ratings

| | | | |
|---------------------|-----------|-------------------------|-------------|
| Range | 311 km | CO2 Emissions | 0 g/km |
| Rated Consumption | 138 Wh/km | Rated Fuel Equivalent | 1.6 l/100km |
| Vehicle Consumption | 123 Wh/km | Vehicle Fuel Equivalent | 1.4 l/100km |

Rated = official figures as published by manufacturer. Rated consumption and fuel equivalency figures include charging losses.
 Vehicle = calculated battery energy consumption used by the vehicle for propulsion and on-board systems.

Real Energy Consumption

between 105 - 219 Wh/km

| | | | |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| City - Cold Weather | 163 Wh/km | City - Mild Weather | 105 Wh/km |
| Highway - Cold Weather | 219 Wh/km | Highway - Mild Weather | 167 Wh/km |
| Combined - Cold Weather | 187 Wh/km | Combined - Mild Weather | 132 Wh/km |

Indication of real-world energy use in several situations. Cold weather: 'worst-case' based on -10°C and use of heating. Mild weather: 'best-case' based on 23°C and no use of A/C. The energy use will depend on speed, style of driving, climate and route conditions.

Safety (Euro NCAP)

| | | | |
|----------------|-------|-----------------------|------|
| Safety Rating | ★★★★★ | Rating Year | 2016 |
| Adult Occupant | 91% | Vulnerable Road Users | 70% |
| Child Occupant | 80% | Safety Assist | 82% |

For more details on the safety rating of this vehicle, visit euroncap.com 

Dimensions and Weight

| | | | |
|-----------------------------|---------|------------------------|---------|
| Length | 4470 mm | Cargo Volume | 357 L |
| Width | 1820 mm | Cargo Volume Max | 1417 L |
| Width with mirrors | No Data | Cargo Volume Frunk | No Data |
| Height | 1450 mm | Roof Load | 0 kg |
| Wheelbase | 2700 mm | Tow Hitch Possible | No Data |
| Weight Unladen (EU) | 1602 kg | Towing Weight Unbraked | 0 kg |
| Gross Vehicle Weight (GVWR) | 1970 kg | Towing Weight Braked | 0 kg |
| Max. Payload | 443 kg | Vertical Load Max | No Data |

Miscellaneous

| | | | |
|----------------|--------------|-----------------------|----------------|
| Seats | 5 people | Car Body | Liftback Sedan |
| Isofix | Yes, 2 seats | Segment | C - Medium |
| Turning Circle | 10.6 m | Roof Rails | No |
| Platform | No Data | EV Dedicated Platform | No Data |

* = estimated value. Average energy consumption and range based on moderate drive style and climate. Real-life values may differ significantly. Pricing information might not be actual for some regions. No rights can be derived from the information on this site.

Home and Destination Charging (0 -> 100%)

Charging is possible by using a regular wall plug or a charging station. Public charging is always done through a charging station. How fast the EV can charge depends on the charging station (EVSE) used and the maximum charging capacity of the EV. The table below shows all possible options for charging the Hyundai IONIQ Electric. Each option shows how fast the battery can be charged from empty to full.

Europe

Charging an EV in Europe differs by country. Some European countries primarily use 1-phase connections to the grid, while other countries are almost exclusively using a 3-phase connection. The table below shows all possible ways the Hyundai IONIQ Electric can be charged, but some modes of charging might not be widely available in certain countries.

Type 2 (Mennekes - IEC 62196)



| Charging Point | Max. Power | Power | Time | Rate |
|----------------------|--------------|----------|--------|---------|
| Wall Plug (2.3 kW) | 230V / 1x10A | 2.3 kW | 19h45m | 13 km/h |
| 1-phase 16A (3.7 kW) | 230V / 1x16A | 3.7 kW | 12h15m | 20 km/h |
| 1-phase 32A (7.4 kW) | 230V / 1x31A | 7.2 kW † | 6h15m | 40 km/h |
| 3-phase 16A (11 kW) | 230V / 1x16A | 3.7 kW † | 12h15m | 20 km/h |
| 3-phase 32A (22 kW) | 230V / 1x31A | 7.2 kW † | 6h15m | 40 km/h |

† = Limited by on-board charger, vehicle cannot charge faster.

Fast Charging (10 -> 80%)

Rapid charging enables longer journeys by adding as much range as possible in the shortest amount of time. Charging power will decrease significantly after 80% state-of-charge has been reached. A typical rapid charge therefore rarely exceeds 80% SoC. The rapid charge rate of an EV depends on the charger used and the maximum charging power the EV can handle. The table below shows all details for rapid charging the Hyundai IONIQ Electric.

- Max. Power: maximum power provided by charge point
- Avg. Power: average power provided by charge point over a session from 10% to 80%
- Time: time needed to charge from 10% to 80%
- Rate: average charging speed over a session from 10% to 80%

Europe

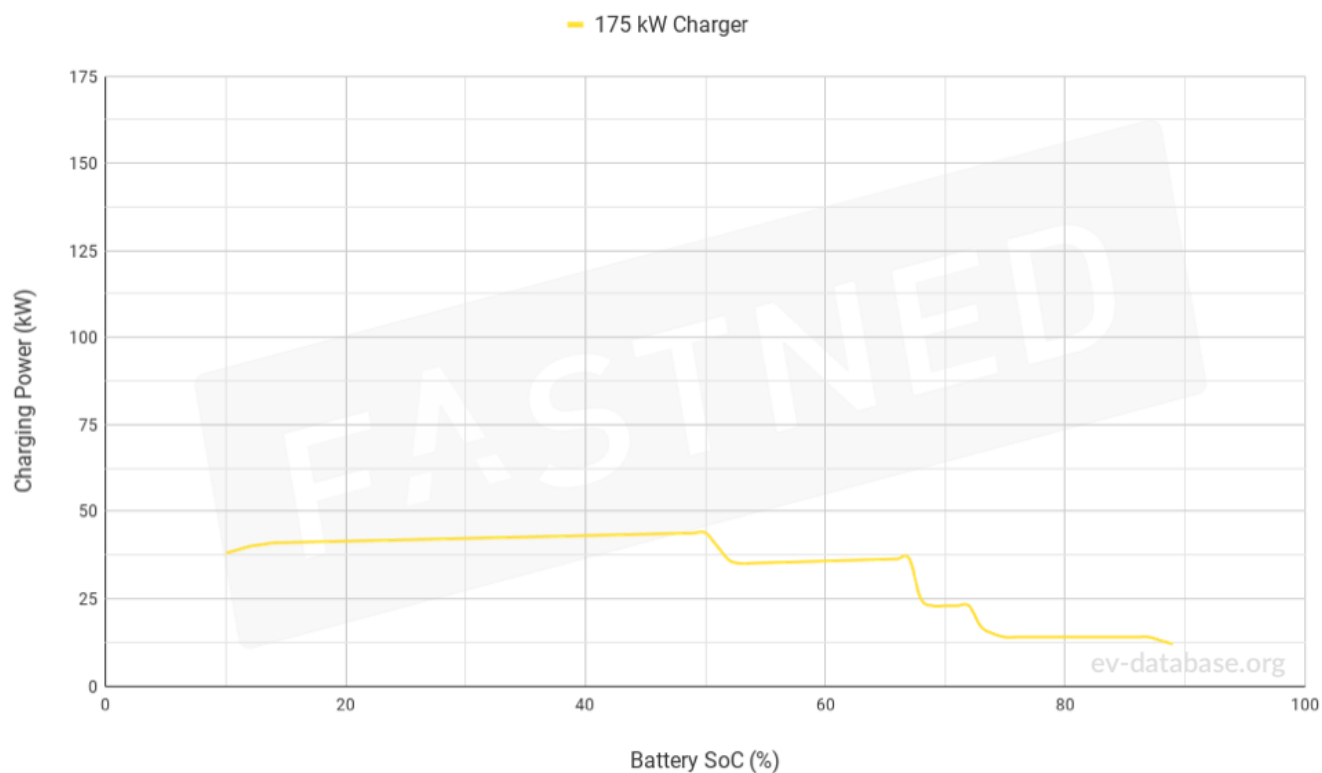
Combined Charging System (CCS Combo 2)



| Charging Point | Max. Power | Avg. Power | Time | Rate |
|----------------|------------|------------|--------|----------|
| CCS (50 kW DC) | 40 kW † | 34 kW † | 50 min | 210 km/h |

| | | | | |
|-----------------|---------|---------|--------|----------|
| CCS (175 kW DC) | 44 kW † | 36 kW † | 47 min | 220 km/h |
| CCS (350 kW DC) | 44 kW † | 36 kW † | 47 min | 220 km/h |

Charge Curve



Data made available by Fastned

FASTNED

† = Limited by charging capabilities of vehicle

Actual charging rates may differ from data shown due to factors like outside temperature, state of the battery and driving style.

(Advertisement)

Preceding model

The model shown on this page is the successor of the Hyundai IONIQ Electric, which was available from October 2016 until September 2019. The previous model had 60 km less range, same acceleration and was 4%

Anexo B. Infografía Bus BYD K9 FE

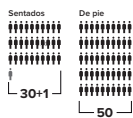
BUS ELÉCTRICO K9FE



CÓMO FUNCIONAN NUESTROS NUEVOS BUSES ELÉCTRICOS

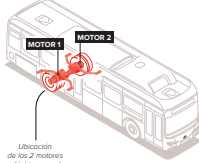
El BYD K9FE versión 2020 es un bus 100% eléctrico de entrada baja diseñado especialmente para el sistema de transporte público de la ciudad de Santiago de Chile. Este bus no genera emisiones contaminantes y tiene muy bajos niveles de ruido. Nueva tecnología y alto estándar para la Red Metropolitana de Movilidad.

CAPACIDAD



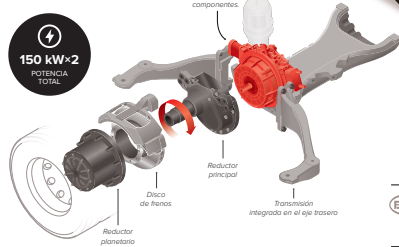
MOTORES

El Bus BYD K9FE posee 2 motores eléctricos BYD que tienen una potencia de 150 kW (300 kW en total) y que se ubican en el eje trasero.



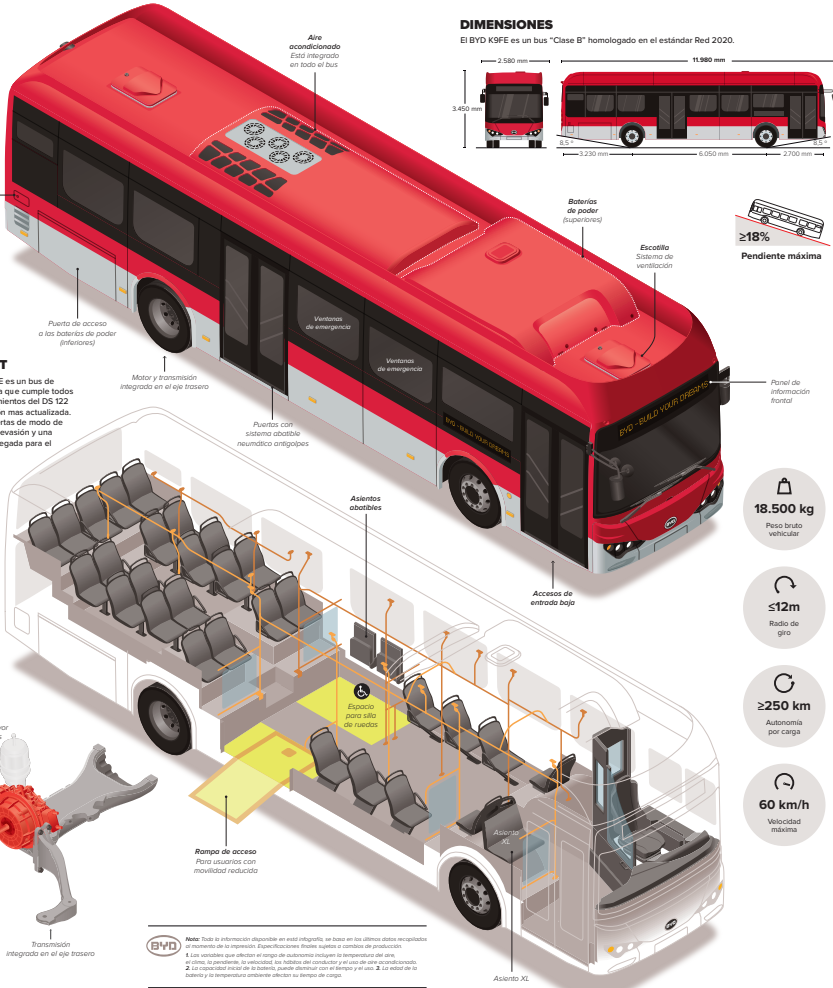
Tecnología BYD in-wheel motor drive
Asegura una alta eficiencia al tener integrada la transmisión en el mismo eje.

150 kW x 2 POTENCIA TOTAL



LAYOUT

El BYD K9FE es un bus de entrada baja que cumple todos los requerimientos del DS 122 en su versión más actualizada. Tiene 2 puentes de modo de controlar la evasión y una cabina segregada para el conductor.



DIMENSIONES

El BYD K9FE es un bus "Clase B" homologado en el estándar Red 2020.



≥18% Pendiente máxima

18.500 kg Peso bruto vehicular

≤12m Radio de giro

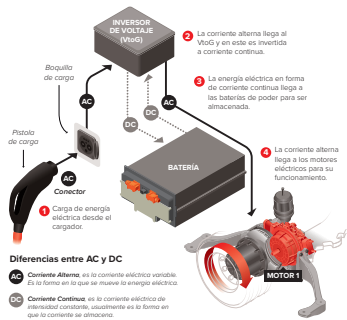
≥250 km Autonomía por carga

60 km/h Velocidad máxima

Nota: Toda la información disponible en este infográfico se basa en los últimos datos recopilados al momento de la impresión. Especificaciones, fotos, sujetos o cambios de producción. 1. Los cambios que afectan el tiempo de carga de un vehículo dependen del consumo de energía en el mismo, su pendiente, la velocidad, las baterías del conductor y el uso de aire acondicionado. 2. La capacidad total de la batería, puede variar con el tiempo y el uso. 3. un estado de la batería y la temperatura ambiente afectan su tiempo de carga.

SISTEMA DE PROPULSIÓN

La tecnología BYD trabaja con un inversor de voltaje interno (VtoG) que se encarga de transformar la corriente alterna en continua de modo de almacenarla en las baterías de poder. Este mismo inversor vuelve a transformar la corriente continua en alterna para llevarla a los motores eléctricos.



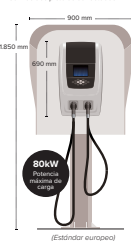
Diferencias entre AC y DC
AC Corriente Alterna es la corriente eléctrica variable. Es la forma en la que se mueve la energía eléctrica.
DC Corriente Continua es la corriente eléctrica de intensidad constante, usualmente es la forma en que la corriente se almacena.

CARGADOR

El BYD EVA 080K101 AC estándar europeo es un cargador que cuenta con dos pistolas de alimentación que pueden ser conectadas al bus de manera individual o simultánea, dependiendo del tiempo de carga requerido.

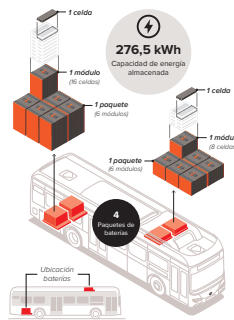
Tiempo de carga < 3 - 4 h

Con los dos pistolas conectados



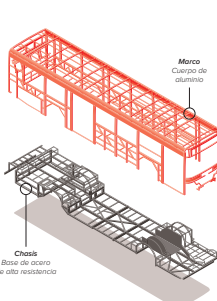
SISTEMA DE BATERÍAS

Las baterías BYD son de fabricación propia con tecnología hierro fosfato, son más seguras, ligeras, protegidas contra impactos, con aislación térmica e impermeables que aseguran una vida útil de al menos cuatro mil ciclos.



ESTRUCTURA INTEGRADA

El BYD K9FE no posee un chasis y una carrocería separadas, sino que se fabrica sobre una estructura integrada que combina hierro y aluminio, dándole mayor resistencia a la vibración, mayor durabilidad y menor peso.



Anexo C. Código para cuantificación de agresividad y consumo energético

Código C.1: Cuantificación agresividad y consumo energético

```
1
2 #CÓDIGO DE CUANTIFICACIÓN DE AGRESIVIDAD Y CONSUMO ENERGÉTICO
3 import pandas as pd
4 import numpy as np
5 import scipy.fftpack as fourier
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from scipy.signal import find_peaks
8
9
10
11 #Primer paso: Importar datos.
12 imp=pd.read_excel('recarre30.xlsx')
13 tiempo=imp['tiempo'].tolist()#se convierten a lista
14 velocidad=imp['velocidad'].tolist()
15 latitud=imp['latitud'].tolist()
16 longitud=imp['longitud'].tolist()
17 batpower=imp['bateria'].tolist()
18
19 #SOC=imp['state'].tolist()
20 vel=[1]*len(velocidad)
21 for i in range(len(velocidad)):
22     vel[i]=velocidad[i]/3.6
23
24
25 #Paso de tiempo
26 t_s=[]
27 t_m=[]
28 #pasamos los datetime a segundos
29 for i in range(len(tiempo)):
30     t_s.append((tiempo[i].hour)*60*60 + (tiempo[i].minute)*60 + tiempo[i].second)
31
32
33 for i in range(len(tiempo)-1):
34     t_m.append(t_s[i+1]-t_s[i])
35
36 #segundo paso: calcular aceleración y jerk
37
38 aceleracion=np.diff(vel)/np.diff(t_s)
39 ace=aceleracion.tolist()
40 ace.append(0)
41 j=np.diff(ace)/np.diff(t_s)
42 jerk=j.tolist()
43 jerk.append(0)
44
45 #3er paso: Borrar periodos de inactividad
46
```

```

47 Vs0=[]
48 for i in range(len(vel)):
49     if vel[i]==0:
50         Vs0=Vs0
51     else:
52         Vs0.append(vel[i])
53
54 #4to paso: Hacer ajuste promedio de velocidad
55 Vajprom=[1]*len(Vs0)
56 prom_Vs0=sum(Vs0)/len(Vs0)
57 for i in range(len(Vs0)):
58     Vajprom[i]=Vs0[i]-prom_Vs0
59
60 #5to paso: Hacer periodograma
61 #pasar la velocidad a fourier y tomar la amplitud
62 Vfou=fourier.fft(Vajprom)#pasamos al espectro de fourier
63 Vampf=abs(Vfou)#amplitud fourier
64
65
66 #calcular f_s y f_real
67 t_medio=sum(t_m)/len(t_m)
68 f_s=1/t_medio
69 N=len(Vampf)
70 f_real=[]
71 for i in range(len(Vampf)):
72     f_real.append((f_s*i)/N)
73
74 #periodograma será f_real vs velocidad en fourier
75 #plt.plot(f_real,Vampf)#por el aliasing deberia cortarlo en f_S/2=0,1
76 #plt.xlim([0,f_s/2])#aliasing
77 #plt.ylabel('periodograma [m^2/s^2/Hz]')
78 #plt.xlabel('frecuencia [Hz]')
79 #plt.title('Velocidad en dominio de frecuencias R30')
80
81
82 #Calculamos la integral
83 #frec sin aliasind
84 f_sa=[]
85 for i in range(len(f_real)):
86     if f_real[i]<=f_s/2:
87         f_sa.append(f_real[i])
88
89
90
91 suma=[]
92 for i in range(len(f_sa)):
93     if i==0:
94         suma.append(Vampf[i]*(f_real[i]))
95     else:
96         suma.append(Vampf[i]*(f_real[i]-f_real[i-1]))
97
98 integral=sum(suma)

```

```

99 por=0.9#porcentaje a abarcar, puede variar.
100 corte=integral*por
101
102 #Buscar la frecuencia de corte
103
104 ptoquiebre=0
105 s=0
106 for i in range(len(suma)):
107     s=s+suma[i]
108     if s>=corte:
109         ptoquiebre=i
110         break
111
112 frec_corte=f_real[ptoquiebre]
113
114
115
116 #REPETIMOS PARA EL JERK
117 jerks0=[]
118 for i in range(len(vel)):
119     if vel[i]==0:
120         jerks0=jerks0
121     else:
122         jerks0.append(jerk[i])
123
124 #4to paso: Hacer ajuste promedio de velocidad
125 Jajprom=[1]*len(Vs0)
126 prom_Js0=sum(jerks0)/len(jerks0)
127 for i in range(len(jerks0)):
128     Jajprom[i]=jerks0[i]-prom_Js0
129
130 Jfou=fourier.fft(Jajprom)#pasamos al espectro de fourier
131 Jampf=abs(Jfou)#amplitud fourier
132
133
134 #periodograma del jerk
135 #plt.plot(f_real,Jampf)
136 #plt.xlim([0,f_s/2])
137 #plt.ylabel('periodograma [m^2/s^6/Hz]')
138 #plt.xlabel('frecuencia [Hz]')
139 #plt.title('Jerk en dominio de frecuencias R67')
140
141 indice = len(f_sa)
142 Jampf_2=Jampf[0:indice]
143
144 Peaks, __ =find_peaks(Jampf)#Devuelve los indices de donde hay peaks
145
146
147 LF=0
148 HF=0
149 for i in range(len(Peaks)):
150     if Peaks[i]<ptoquiebre:

```

```

151     LF=LF+1
152     else:
153         HF=HF+1
154
155 RA=HF/(LF + HF)
156
157 #2da etapa: Consumo energético: kwh
158 potencia=batpower
159
160
161 s_energia=[]
162 for i in range(len(potencia)):
163     if i==0:
164         s_energia.append(potencia[i]*t_medio)
165     else:
166         s_energia.append(potencia[i]*(t_s[i]-t_s[i-1]))
167
168 consumokws=sum(s_energia)
169 Ckwh=consumokws/(60*60)
170
171 #forma 2
172 t_h=[]
173 for i in range(len(t_s)):
174     t_h.append(t_s[i]/3600)
175
176 t_medioh=t_medio/3600
177
178
179 cons2=[]
180 for i in range(len(potencia)):
181     if i==0:
182         cons2.append(potencia[i]*t_medioh)
183     else:
184         cons2.append(potencia[i]*(t_h[i]-t_h[i-1]))
185
186 consumokwh=sum(cons2)
187
188 #Queremos calcular el driver aggressiveness
189
190 DAjerkprom2=sum(Jampf_2)/len(Jampf_2)
191 print(DAjerkprom2)
192
193 #print(consumokwh)
194 #print('el Ripple agresiveness es ', RA)
195 #print('el consumo energético es de', Ckwh, 'kwh')
196 #print('la frecuencia de corte es ', frec_corte)
197
198 plt.plot(t_s,ace)
199 plt.xlabel('Tiempo [s]')
200 plt.ylabel('aceleración [m/s^2]')
201 plt.title('aceleración vs tiempo R30')

```

Anexo D. Frecuencia óptima de muestreo de datos

Con el fin de poder proponer una frecuencia de muestreo se comparan dos recorridos generales y muy simplificados descritos con sus curvas de velocidad vs tiempo en la figura D.1, en esta se observa un recorrido ideal en el cual el vehículo acelera con su máxima aceleración, luego se mantiene a velocidad constante y finalmente frena también con desaceleración máxima (que se asume igual pero de signo contrario a la aceleración máxima) el segundo caso corresponde a uno más agresivo en el cual el vehículo acelera y frena con aceleración máxima constantemente.

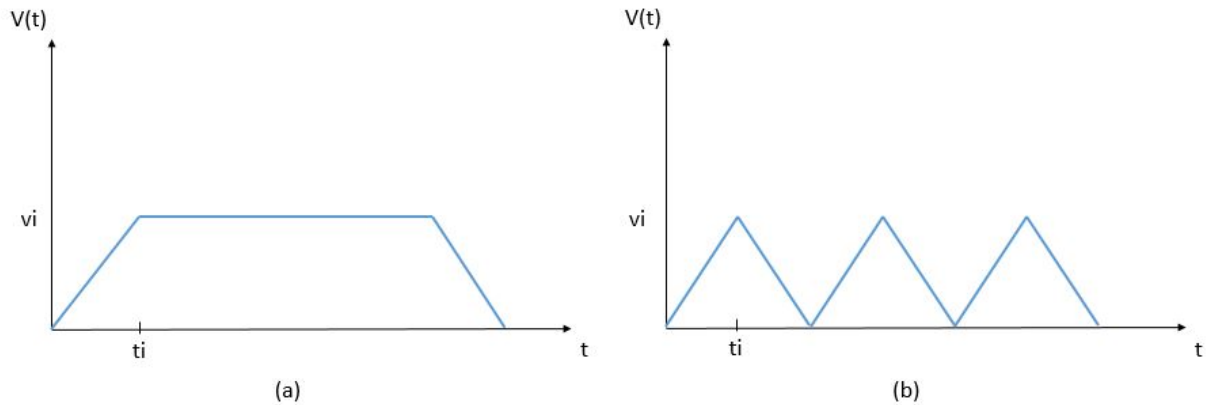


Figura D.1: Recorrido ideal (a) y recorrido agresivo (b)

Luego, para poder describir de buena forma ambos recorridos, especialmente el recorrido agresivo es que es necesario que se tome un dato por cada t_i segundos. Se debe considerar además que las aceleraciones máximas de los vehículos son:

- Taxis: aumentan su velocidad de 0 a 100 km/h en 9.7 segundos (aceleración máxima de $2,863 \text{ m/s}^2$)
- Buses: aumentan su velocidad de 0 a 50 km/h en 20 segundos (aceleración máxima de $0,6944 \text{ m/s}^2$)

La frecuencia óptima, será poder tomar los datos de forma que midan los peaks de velocidad y los momentos en que la velocidad es nula, de esta forma, cuando se interpole para encontrar la velocidad en cada punto se encontrará una curva muy similar a la original. Cómo la aceleración corresponde a la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, entonces el t_i estará dado por:

$$t_i = \frac{v_i}{a_{max}} \quad (\text{D.1})$$

La tabla D.1 muestra las frecuencias encontradas al variar la velocidad alcanzada, esto permite obtener un rango de frecuencias que permiten describir de buena forma los recorridos realizados por los taxis y los buses. Si bien este método omite información como el efecto del cambio de masa, permite tener una noción del rango que deben tener las frecuencias de muestreo.

Tabla D.1: Frecuencias de muestreo según velocidad alcanzada

| Velocidad [km/h] | Taxi | | Buses | |
|------------------|------|------|-------|-------|
| | ti | f | ti | f |
| 20 | 2 | 0.50 | 8 | 0.125 |
| 30 | 3 | 0.33 | 12 | 0.083 |
| 40 | 4 | 0.25 | 16 | 0.063 |
| 50 | 5 | 0.20 | 20 | 0.050 |
| 60 | 6 | 0.17 | 24 | 0.042 |
| 70 | 7 | 0.14 | | |
| 80 | 8 | 0.13 | | |
| 90 | 9 | 0.11 | | |
| 100 | 10 | 0.10 | | |