



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

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO SOMETIDO A
DIVERSAS CONDICIONES EN LA ZONA CENTRAL Y SUR DE CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DANIEL MARCELO CARBACHO VARAS

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE REYES MARAMBIO
GABRIEL GUGGISBERG ALARCÓN

SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2020

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO SOMETIDO A DIVERSAS CONDICIONES EN LA ZONA CENTRAL Y SUR DE CHILE

En el último tiempo la electromovilidad ha adquirido enorme importancia a nivel mundial en el combate por los efectos del cambio climático, considerando que uno de los principales problemas es la acumulación de gases de efecto invernadero, siendo el transporte terrestre el causante de casi un tercio de las emisiones de CO_2 a nivel mundial. La inclusión particular de vehículos eléctricos (VE) en el mundo supone una enorme fuente de estudio y posibilidad de generar conocimiento, y Chile no debe quedar ajeno a esa realidad. Bajo este contexto, el objetivo general de la presente investigación es analizar el comportamiento energético y estimar la degradación de la batería de un VE en distintas rutas de la zona central y sur de Chile. Teniendo como objetivos específicos la caracterización energética de un VE, determinar y cuantificar la agresividad en la conducción, estimar la degradación de la batería y finalmente establecer relaciones entre los tres ejes de investigación antes mencionados.

La metodología se basa en estudiar el comportamiento de un VE en diversas condiciones y rutas de diferentes distancias. Éstas quedan separadas en 3 tipos de rutas: Cortas (trayectos menores a 10 km), Medianas (trayectos entre 10 y 30 km) y Largas (trayectos mayores a 30 km). A su vez, dicha clasificación se enmarca en la separación de trayectos que respondan a perfiles de velocidad de ciclos de ciudad (Rutas Cortas), ciclos de autopista (Rutas Largas) y una combinación de las dos anteriores (Rutas Medianas). La metodología de los ejes de estudio se basa principalmente en la construcción de planillas en software de cálculo y programación computacional de modelos previamente estudiados.

Los principales resultados exhiben que el rendimiento, en términos de km/kWh, es mayor para las Rutas Cortas, seguidas de las Rutas Medianas y Largas, y se debe principalmente a la mayor regeneración en distancia en Rutas Cortas. Sin embargo, la eficiencia de regeneración va en aumento, es decir, se aprovecha en mayor cantidad el potencial de regeneración presente en las Rutas Largas. Respecto a la cuantificación de la agresividad en la conducción, las Rutas Cortas exhiben mayor correlación entre indicadores energéticos y métrica *Ripple Aggressiveness* (RA), en particular un aumento en la agresividad (RA) propicia un aumento en el rendimiento o bien una relación negativa con el consumo eléctrico. Además, la degradación muestra que la cantidad de ciclos a 70% de capacidad va en aumento en el siguiente orden: Rutas Largas, Cortas y Medianas. Finalmente, resulta una relación positiva entre la agresividad en la conducción (RA) y la cantidad de ciclos a la degradación para las Rutas Cortas, situación inversa para las Rutas Largas, mientras que las Rutas Medianas no presentan correlación.

Por último, se logran los objetivos de la investigación, siendo posible obtener una serie de relaciones entre los ejes de estudio, logrando caracterizar la batería energéticamente y su degradación a diversas condiciones y estilos de conducción.

*Dedicado a mi madre, padre, hermanos, Nanita y amigos.
Por apoyar y confiar siempre en mi. Sin ellos nada de esto sería posible...*

Agradecimientos

No podría partir los agradecimientos sin antes reconocer el enorme esfuerzo que han realizado mis padres, Julia y Carlos, por sacar adelante a nuestra familia. Siempre han estado conmigo, apoyando, aconsejando y prestando ayuda en todo lo que necesito, nunca han desconfiado de las decisiones importantes que he tomado y en estos casi 7 años, su cariño y amor fue incondicional. Desde el día uno, por allá en el lejano 2014, me desearon lo mejor confiando en que podría dar todo de mi y así hasta hoy en día que pese a las dificultades que estamos viviendo, logramos salir adelante. Especialmente este proceso de formación académica y sobretodo humana, se los dedico a ellos.

También quiero agradecer a mi Nanita, mi abuela, ella siempre ha estado con nosotros, todos hemos sido parte de su cariño y enseñanzas, y ahora en este punto del tiempo sé que debe estar tremendamente orgullosa de lo que he logrado. Nunca olvidaré como cada domingo, momento en que debía regresar a Santiago, me deseaba lo mejor, siempre recordándome el cuidado y dedicación que debía ponerle a las cosas.

Mis 2 hermanos, Carlos y Felipe, también han sido parte importante en este camino. Las familias que ellos han formado, sobretodo sus hijos (mis sobrinos: Violeta, Agustín, Florencia, José Felipe y Mariana) que me han dado un motivo más por el cual lograr mis objetivos, por que puedo ser parte de su crecimiento, entregándoles cariño y enseñanzas. A pesar de que el último tiempo nos hemos alejado un poco, por razones naturales, siempre está esa palabra de aliento y confianza.

Me gustaría seguir con la gran familia que me acogió por estos años en Santiago, hablo de la tía Inés y el tío Peter, quienes sin intereses personales quisieron recibirme y hacer de su hogar mi segunda casa, lugar donde logré aprender no tan solo de esas largas jornadas de estudio sino que también me dieron la posibilidad de aprender de sus vivencias y de las diversas circunstancias de la vida que sin duda me han ayudado a entender de mejor manera nuestro mundo. No cabe duda que su apoyo fue parte fundamental de mi formación profesional y personal.

La vida en estos últimos 7 años no hubiera sido posible sin la presencia de mis amigos. Especialmente quiero agradecer a mi amigo de años, Fernando, con el que he convivido y compartido mis días en Santiago, no está de más destacar su lealtad, apoyo y confianza, las

cuales han sido parte fundamental de nuestra amistad desde el colegio, en él siempre se puede encontrar una palabra sabia y sincera. También quiero agradecer a más amigos del colegio, especialmente a Ruthito, Mariana y Nachito, quienes si bien el último tiempo la vida nos ha alejado un poco, la amistad sigue intacta. A todos ellos les puedo decir que no me arrepiento de las grandes personas que la vida me puso en frente.

La llegada a Santiago sin duda estuvo marcada por la venida de nuevos amigos y personas con las que he compartido en diversas circunstancias. En primer lugar, mis amigos desde el primer año de universidad: Kay, Emilio, Carlos, Pablo y Gabriel, con ellos hemos vivido momentos únicos de risas, celebraciones e incluso penas, pero hasta el día de hoy seguimos unidos. Al momento de entrar a la especialidad conocí más gente, especialmente quiero agradecer a Panchote y Poblete, con ambos logramos afiatarnos y crear una bonita amistad en estos últimos 2 años. Finalmente, la estadía en mi segunda casa en Maipú, conocí en crossfit a Allison que sin duda le dio algo especial a mi último año de universidad, al principio ninguno imaginó que lograríamos formar una linda amistad, pero diversas circunstancias hicieron que nos reuniéramos y pasáramos momentos únicos. A todos ellos los quiero y estimo muchísimo.

Por último, quiero agradecer a mi profesor guía, Williams, a mi comisión Jorge y Gabriel, y a Aramis, quienes hicieron posible un mejor desarrollo del trabajo de título, que sin duda será de gran ayuda para mi vida profesional.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Contexto | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.2.1. Objetivo general | 2 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 2 |
| 1.3. Alcances | 3 |
| 2. Antecedentes | 4 |
| 2.1. Electromovilidad y contexto actual | 4 |
| 2.2. Vehículo 100 % eléctrico (BEV) | 7 |
| 2.2.1. Partes del vehículo eléctrico | 7 |
| 2.3. Conceptos básicos en degradación de batería | 8 |
| 2.4. Contexto de la investigación | 9 |
| 2.5. Literatura y metodologías de investigación | 10 |
| 3. Descripción de modelos | 13 |
| 3.1. Modelo de caracterización energética del sistema de almacenamiento | 13 |
| 3.1.1. Modelo de consumo energético basado en potencias | 14 |
| 3.1.2. Eficiencia del freno regenerativo η_{rb} | 16 |
| 3.2. Modelo de cuantificación de la agresividad en la conducción | 16 |
| 3.2.1. Transformada de Fourier Discreta | 17 |
| 3.2.2. Procesamiento de los datos | 18 |
| 3.2.3. <i>Ripples Aggressiveness</i> (RA) | 22 |
| 3.3. Modelo de degradación de la batería | 22 |
| 3.3.1. Método propuesto | 23 |
| 4. Metodologías | 25 |
| 4.1. Metodología base de la investigación | 25 |
| 4.2. Modelo de caracterización energética del sistema de almacenamiento | 26 |
| 4.3. Modelo de cuantificación de la agresividad en la conducción | 27 |
| 4.4. Modelo de degradación de la batería | 28 |
| 5. Resultados | 30 |
| 5.1. Caracterización energética del sistema de almacenamiento | 30 |
| 5.2. Cuantificación de la agresividad en la conducción y relación con indicadores energéticos | 32 |
| 5.3. Degradación de la batería | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 6. Análisis de resultados | 38 |
| 6.1. Caracterización energética del sistema de almacenamiento | 38 |
| 6.2. Cuantificación de la agresividad en la conducción | 40 |
| 6.3. Degradación de la batería | 41 |
| Conclusión | 43 |
| A. Tablas resumen Modelo de Caracterización Energética por tipo de ruta | 48 |
| B. Gráficas Modelo de Caracterización Energética de todas las rutas estudiadas | 52 |
| C. Código MATLAB para modelo de cuantificación de agresividad en la conducción | 75 |
| D. Gráficos de dispersión de la relación entre indicadores energéticos y RA | 80 |
| E. Código MATLAB implementación modelo de degradación | 84 |
| F. Evolución de la capacidad por ciclos para todas las rutas | 87 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Datos principales reportados por el fabricante. Fuente: Manual Nissan LEAF 2018 | 9 |
| 5.1. Resumen de características e indicadores promedio de las rutas realizadas . . | 30 |
| 5.2. Resumen de indicadores estadísticos para frecuencia de corte al 90 % | 33 |
| 5.3. Resumen de indicadores estadísticos para resultados de <i>Ripple Aggressiveness</i> | 33 |
| 5.4. Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para el caso 1 considerando la totalidad de las rutas. | 33 |
| 5.5. Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para los casos 2 y 3 de las Rutas Cortas. | 33 |
| 5.6. Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para los casos 2 y 3 de las Rutas Medianas. | 35 |
| 5.7. Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para los casos 2 y 3 de las Rutas Largas. | 35 |
| 5.8. Resumen de indicadores estadísticos para número de ciclos. | 35 |
| 5.9. Estimación cantidad de ciclos al 70 % de capacidad estudio de realización aleatoria de rutas. | 37 |
| F.1. Número de ciclos al 70 % de capacidad de todas las rutas. | 87 |

Índice de Ilustraciones

| | |
|--|----|
| 2.1. Tipos de tecnologías en vehículos eléctricos. | 5 |
| 2.2. Evolución anual del stock mundial de BEV y PHEV del periodo 2013-2017. Fuente: Agencia Internacional de Energía (2018) | 6 |
| 2.3. Evolución anual de la cantidad de vehículos eléctricos e híbridos vendidos desde 2011 hasta 2017. Fuente: Agencia de Sostenibilidad Energética (2018) | 6 |
| 2.4. Modelos de vehículos 100 % eléctricos: Hyundai Ioniq - BMW i3 - Tesla Model S. | 7 |
| 2.5. Partes Nissan LEAF 1era generación | 8 |
| 2.6. Nissan LEAF 2018. Fuente: Manual Nissan LEAF 2018 | 9 |
| 2.7. Scanner automotriz OBD2. | 10 |
| 2.8. Perfiles de velocidad, potencia y estados de carga de un caso de estudio. Fuente: Fiori et al. (2016) | 11 |
| 2.9. Gráficas de la evolución por ciclos de la capacidad en diferentes experimentos. Fuente: Pérez et al. (2017). | 12 |
| 3.1. Esquema del flujo de energía y eficiencias del vehículo eléctrico. Elaboración propia. | 15 |
| 3.2. Ejemplar de un perfil de velocidad. Fuente: Liu et al. (2015). | 18 |
| 3.3. Ejemplar de un perfil de velocidad ajustado con el valor promedio y filtración de periodos de inactividad. Fuente: Liu et al. (2015). | 19 |
| 3.4. Espectro de Fourier de la señal de velocidad. Fuente: Liu et al. (2015). | 19 |
| 3.5. Gráfico de dispersión de la frecuencia de corte y velocidad promedio. Fuente: Liu et al. (2015). | 20 |
| 3.6. Espectro de Fourier de una señal de aceleración. Fuente: Liu et al. (2015). | 21 |
| 3.7. Espectro de Fourier de una señal de tirón. Fuente: Liu et al. (2015). | 21 |
| 3.8. Factores de escala de acuerdo a porcentaje de degradación y rango de estado de carga. Fuente: Pérez et al. (2017). | 23 |
| 3.9. Gráfico de dispersión de los estados conocidos para promedio de rango de oscilación y oscilación del estado de carga. Fuente: Pérez et al. (2017). | 24 |
| 5.1. Gráficos caracterización energética para ruta corta C9 | 31 |
| 5.2. Gráficos caracterización energética para ruta corta M14 | 31 |
| 5.3. Gráficos caracterización energética para ruta corta L8 | 32 |
| 5.4. Gráficos de dispersión considerando varianzas del 99 % y 90 %. | 32 |
| 5.5. Histogramas de la distancia entre estados <i>ripple aggressiveness</i> - consumo eléctrico y su ajuste lineal. | 33 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.6. | Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y RA para el caso 2. | 34 |
| 5.7. | Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y RA para el caso 3. | 34 |
| 5.8. | Histogramas de la cantidad en el número de ciclos según rangos para cada tipo de ruta. | 35 |
| 5.9. | Evolución de la capacidad por ciclos Ruta Corta C5. Número de ciclos al 70 % de capacidad = 2.852. | 36 |
| 5.10. | Evolución de la capacidad por ciclos Ruta Mediana M4. Número de ciclos al 70 % de capacidad = 2.953. | 36 |
| 5.11. | Evolución de la capacidad por ciclos Ruta Larga L12. Número de ciclos al 70 % de capacidad = 2.706. | 36 |
| 5.12. | Relación entre variables <i>Ripple Aggressiveness</i> y cantidad de ciclos al 70 % capacidad. | 37 |
| | | |
| A.1. | Tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de las Rutas Cortas. | 49 |
| A.2. | Tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de las Rutas Medianas. | 50 |
| A.3. | Tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de las Rutas Largas. | 51 |
| | | |
| B.1. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C1 | 53 |
| B.2. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C2 | 53 |
| B.3. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C3 | 54 |
| B.4. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C4 | 54 |
| B.5. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C5 | 55 |
| B.6. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C6 | 55 |
| B.7. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C7 | 56 |
| B.8. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C8 | 56 |
| B.9. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C10 | 57 |
| B.10. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C11 | 57 |
| B.11. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C12 | 58 |
| B.12. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C13 | 58 |
| B.13. | Gráficos caracterización energética para ruta corta C14 | 59 |
| B.14. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M1 | 59 |
| B.15. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M2 | 60 |
| B.16. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M3 | 60 |
| B.17. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M4 | 61 |
| B.18. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M5 | 61 |
| B.19. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M6 | 62 |
| B.20. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M7 | 62 |
| B.21. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M8 | 63 |
| B.22. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M9 | 63 |
| B.23. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M10 | 64 |
| B.24. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M11 | 64 |
| B.25. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M12 | 65 |
| B.26. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M13 | 65 |
| B.27. | Gráficos caracterización energética para ruta mediana M15 | 66 |

| | |
|--|----|
| B.28. Gráficos caracterización energética para ruta mediana M16 | 66 |
| B.29. Gráficos caracterización energética para ruta mediana M17 | 67 |
| B.30. Gráficos caracterización energética para ruta mediana M18 | 67 |
| B.31. Gráficos caracterización energética para ruta larga L1 | 68 |
| B.32. Gráficos caracterización energética para ruta larga L2 | 68 |
| B.33. Gráficos caracterización energética para ruta larga L3 | 69 |
| B.34. Gráficos caracterización energética para ruta larga L4 | 69 |
| B.35. Gráficos caracterización energética para ruta larga L5 | 70 |
| B.36. Gráficos caracterización energética para ruta larga L6 | 70 |
| B.37. Gráficos caracterización energética para ruta larga L7 | 71 |
| B.38. Gráficos caracterización energética para ruta larga L9 | 71 |
| B.39. Gráficos caracterización energética para ruta larga L10 | 72 |
| B.40. Gráficos caracterización energética para ruta larga L11 | 72 |
| B.41. Gráficos caracterización energética para ruta larga L12 | 73 |
| B.42. Gráficos caracterización energética para ruta larga L13 | 73 |
| B.43. Gráficos caracterización energética para ruta larga L14 | 74 |
| B.44. Gráficos caracterización energética para ruta larga L15 | 74 |
| | |
| C.1. Código de programación para determinación de frecuencia de corte y <i>Ripple Aggressiveness</i> | 79 |
| | |
| D.1. Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y <i>Ripple Aggressiveness</i> para todas las rutas. | 81 |
| D.2. Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y <i>Ripple Aggressiveness</i> en Caso 2 para Rutas Medianas. | 81 |
| D.3. Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y <i>Ripple Aggressiveness</i> en Caso 3 para Rutas Medianas. | 82 |
| D.4. Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y <i>Ripple Aggressiveness</i> en Caso 2 para Rutas Largas. | 82 |
| D.5. Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y <i>Ripple Aggressiveness</i> en Caso 3 para Rutas Largas. | 83 |
| | |
| E.1. Código de programación para determinación de número de ciclos a la degradación. | 86 |
| | |
| F.1. Evolución de la capacidad por ciclos de Rutas Cortas | 90 |
| F.2. Evolución de la capacidad por ciclos de Rutas Medianas | 93 |
| F.3. Evolución de la capacidad por ciclos de Rutas Largas | 96 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

La electromovilidad es un fenómeno que ha revolucionado los sistemas de transporte por nuestros días. Ello se debe en parte a la importancia que han adquirido los vehículos eléctricos (VE) ya que su masificación supone una medida potencialmente efectiva para combatir el calentamiento global, considerando que el transporte motorizado terrestre es el causante de poco más del 30 % de las emisiones de CO_2 al medio ambiente en Chile, según datos de la IEA [1].

En concreto, la electromovilidad hace referencia al uso de vehículos eléctricos, siendo entendido como aquellos que hacen uso de combustible y/o energía alternativa impulsada por uno o más motores eléctricos, según un documento elaborado para el Congreso nacional de Chile en 2018. De la anterior cita es posible desprender que la electromovilidad engloba más que solo los vehículos de 4 ruedas, incluye también a *scooters*, bicicletas, motocicletas, carros de transporte de cargas, etc.

En particular, dada la creciente necesidad de cambiar los métodos de movilización, gran parte de la industria automotriz ha fijado sus esfuerzos en la oferta de una mayor cantidad de vehículos eléctricos, siendo éstos similares a sus homólogos impulsados por un motor térmico. Aspectos como la fuente de poder que alimenta al vehículo y la reducción en la cantidad de piezas mecánicas necesarias para el sistema de propulsión hacen de este medio de transporte menos costoso en su mantención y brinda la posibilidad de no contaminar debido a la presencia de un motor eléctrico en lugar de un motor térmico.

El contexto actual ha demostrado que los volúmenes de oferta y demanda de vehículos eléctricos ha ido creciendo. En 2018, se alcanzaron 2,1 millones de vehículos eléctricos vendidos (entre vehículos 100 % eléctricos (BEV) e híbridos enchufables (PHEV)) [2]; Noruega, el año 2019 alcanzó casi el 60 % del parque automotriz nuevo ofertado [3] y finalmente el caso

chileno, exhibiendo un aumento exponencial en la venta de este tipo de automóviles desde el año 2011 [4].

Los aspectos anteriormente descritos configuran la necesidad de buscar y estudiar nichos de investigación que den cuenta del comportamiento de este tipo de vehículos en el contexto nacional, más aun cuando Chile es un país de una variedad importante de climas, zonas geográficas y desarrollo de una serie de actividades económicas que impliquen movilización humana y de bienes.

Por otra parte, entender la dinámica energética del sistema de almacenamiento (batería de ión-litio), la estrecha relación entre los estilos de conducción y el comportamiento energético, así como también la degradación de la batería son los focos principales en las cuales se enmarca la presente investigación.

Para ello, dos actores importantes participarán de la investigación. Por una parte, la Agencia de Sostenibilidad Energética, fundación de derecho privado dependiente del Ministerio de Energía, que brindará apoyo de sus dependencias, al contar con el vehículo eléctrico Nissan LEAF 2018 y el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) que junto a la Agencia prestará asesoría profesional y técnica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de investigación es analizar el comportamiento energético y estimar la degradación de la batería de un vehículo eléctrico en distintas rutas de la zona central y sur de Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar energéticamente el *performance* de un vehículo eléctrico y su relación con variables del trayecto por medio de la implementación de un modelo energético basado en potencias.
- Determinar la agresividad de la conducción en rutas realizadas a través de la implementación de la métrica *Ripple Aggressiveness* (RA).
- Estimar la degradación de la batería de un vehículo eléctrico a través del estudio de Eficiencia Coulómbica.

- Establecer relaciones entre los tres ejes de estudio: Caracterización energética, agresividad en la conducción y degradación de la batería.

1.3. Alcances

Se estudia el consumo y fraccionamiento energético de la realización de rutas específicas en un vehículo 100 % eléctrico Nissan LEAF 2018 con una batería capaz de entregar hasta 40 [kWh] de energía. También se estudian los perfiles de conducción asociados a los datos registrados a través de telemetría para las rutas ya señaladas, implementando una métrica capaz de caracterizar el grado de agresividad del conductor. Por último, se realiza un estudio de la degradación de la batería del vehículo mencionado, estimando la cantidad de ciclos que alcanza hasta cierto nivel de degradación y su relación con los dos tópicos anteriormente señalados.

VARIABLES DE TIPO CLIMÁTICAS NO SON CONSIDERADAS EN ESTE ESTUDIO, además de la programación previa de estados de carga del vehículo eléctrico son no controlables, esta última debido a la logística interna de la Agencia de Sostenibilidad Energética.

La mayor parte del análisis se centra en la descripción e interpretación de características mecánicas y eléctricas, en términos energéticos fundamentalmente. Estableciendo relaciones de tipo cuantitativas y cualitativas para responder a los objetivos de la investigación.

Cabe destacar que el presente trabajo considera el uso de datos operacionales disponibles del proyecto 5.000 kms eléctricos de la Agencia de Sostenibilidad Energética y de ciertos trayectos propuestos por el tesista. La implementación y validación de los modelos físicos y matemáticos considerados son realizados mediante los datos operacionales previamente mencionados.

Capítulo 2

Antecedentes

A continuación son presentados los antecedentes necesarios para entender el contexto de la investigación realizada, desarrollando tópicos relacionados con la electromovilidad en su contexto actual hasta las investigaciones y metodologías aplicadas en diversas disciplinas de la ingeniería y ciencias.

2.1. Electromovilidad y contexto actual

La electromovilidad es entendida como las tecnologías que permiten que medios de transporte sean impulsados por uno o más motores eléctricos. Existen cuatro principales tecnologías impulsadas por este tipo de máquinas y tienen la particularidad de emitir nula o bajas emisiones de sustancias contaminantes en comparación a sus homólogos impulsados íntegramente por un motor térmico. Dichas tecnologías se detallan a continuación:

- 100 % eléctricos (BEV): presentan solo uno o más motores eléctricos alimentados íntegramente por una batería de ion-litio, la cual puede cargarse por lo general en regímenes de carga lenta y rápida, dependiendo de la potencia suministrada.
- Híbrido enchufable (PHEV): dualidad entre un motor térmico y uno o más motores eléctricos. Es posible cargar la batería a través de un conector externo.
- Híbrido (HEV): dualidad entre un motor térmico y uno o más motores eléctricos. La batería que alimenta el o los motores eléctricos es cargada cuando el vehículo se encuentra en movimiento, en particular en regímenes de regeneración. No posee un conector externo para cargar la batería como es el caso del híbrido enchufable.
- Celdas de combustible (FCV): este tipo de tecnologías utilizan el hidrógeno como combustible para alimentar el motor eléctrico.

A continuación un resumen de las cuatro principales tecnologías de vehículos eléctricos:

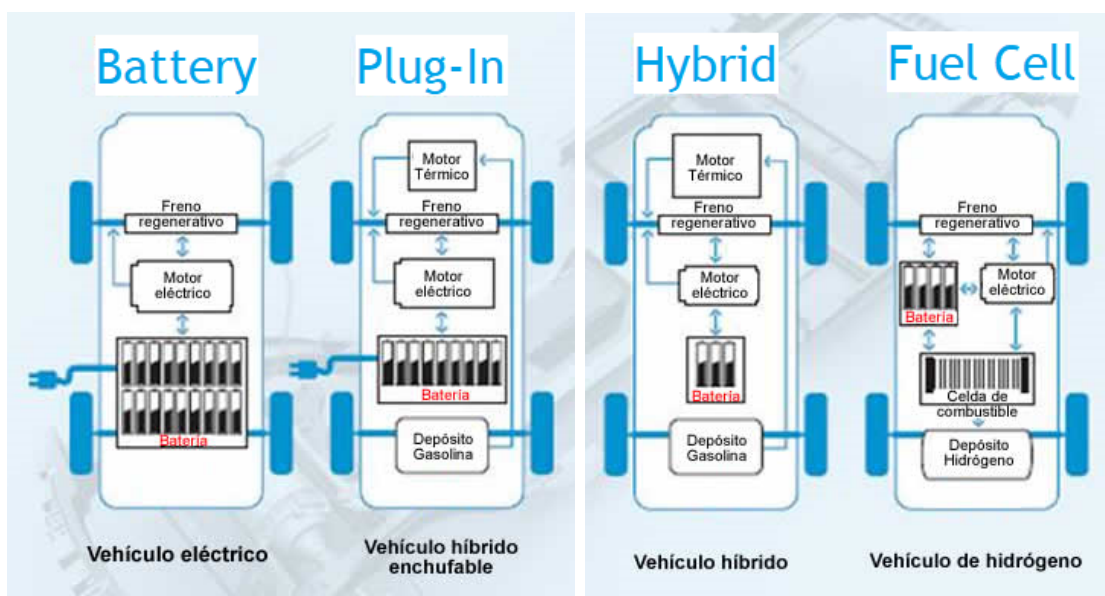


Figura 2.1: Tipos de tecnologías en vehículos eléctricos.

Cabe señalar que además de los automóviles comunes, se incluyen en el concepto de electromovilidad a los ferrocarriles, buses, camiones, *scooters*, motocicletas, bicicletas, entre otros. En particular, los automóviles han ocupado un espacio importante en el desarrollo de dichas tecnologías y actualmente la industria automotriz ha puesto su atención en la fabricación de diversos modelos impulsados íntegramente por la energía que puede suministrar una batería de ión-litio. Tal es el caso del Nissan LEAF, el vehículo 100 % eléctrico más vendido actualmente en el mundo, llegando a más de 50 países, entre ellos Chile (desde 2019) [5] y supera los 400 mil ejemplares comercializados en el mundo hasta principios del año 2019 según [6].

Volviendo a la problemática medioambiental, el mundo científico ha hecho hincapié en la necesidad de cambiar la forma de propulsar los medios de transporte [7]. Dicho cambio radica en utilizar maquinaria con nula o baja emisión de CO_2 y otros gases contaminantes, además de la implementación de mecanismos más eficientes, en términos energéticos. Es en este punto que la electromovilidad se muestra como un camino viable para el combate de las dificultades descritas y en gran parte por ésta razón es que la oferta y demanda de vehículos eléctricos ha aumentado los últimos años, siendo los principales poseedores de dicha tecnología países como China, Estados Unidos, Noruega, Francia, entre otros. Ejemplificando con números, hasta la fecha se han vendido más de tres millones de vehículos eléctricos, entre 100 % eléctricos e híbridos enchufables; estimaciones realizadas para el año 2040, determinan que los ve superen la cantidad de sus homólogos convencionales [8]. Finalmente, en el año 2019 casi el 60 % del parque automotriz nuevo ofertado en Noruega fue 100 % eléctrico, según [3]. A continuación una gráfica de la evolución anual del *stock* mundial de vehículos eléctricos, entre 100 % eléctricos e híbridos enchufables.

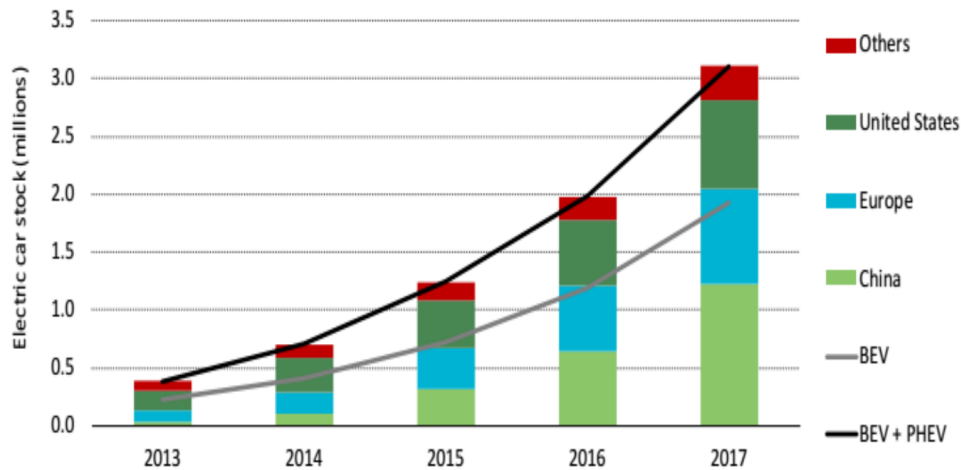


Figura 2.2: Evolución anual del stock mundial de BEV y PHEV del periodo 2013-2017. Fuente: Agencia Internacional de Energía (2018)

La situación de Chile en los últimos años ha sido el exponencial aumento de la cantidad de vehículos eléctricos e híbridos enchufables vendidos, comercializando cerca de 10 en el año 2011 hasta más de 130 para el 2017 tal como se muestra en la figura 2.3. El primer VE comercializado fue el Mitsubishi i-Miev y la venta del total de VEs ofertados hasta el primer trimestre del 2017 fueron un total de 140, siendo los modelos Ioniq de Hyundai (61 unidades) y Leaf de Nissan (26 unidades) como los 2 principales modelos más vendidos según [4]. En el año 2019, particularmente el mes de abril, se posicionó como el mes de mayor venta de autos eléctricos e híbridos enchufables, con un total de 41 según la Asociación Nacional Automotriz de Chile [9].

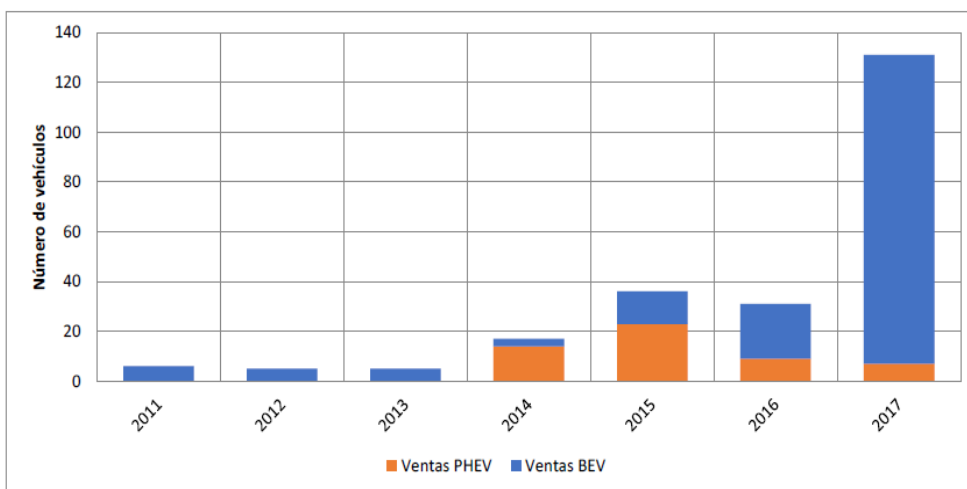


Figura 2.3: Evolución anual de la cantidad de vehículos eléctricos e híbridos vendidos desde 2011 hasta 2017. Fuente: Agencia de Sostenibilidad Energética (2018)

2.2. Vehículo 100 % eléctrico (BEV)

Presentado lo anterior, un vehículo eléctrico actualmente no es más que un móvil impulsado por uno o más motores eléctricos que junto a un sistema de electrónica de potencia aprovecha la capacidad de almacenamiento de energía en una batería de ion-litio. Por lo general su aspecto visual es similar al automóvil de combustión interna, poseen un chasis, carrocería, motor eléctrico y transmisión, batería de ión-litio, inversor y equipos de electrónica de potencia, además de equipos auxiliares. Actualmente en el mercado son ofertados una veintena de modelos de tipo sedan, *hatchback*, camionetas, entre otros; poseen una autonomía que va desde los 130 a más de 300 kilómetros, dependiendo de la capacidad medida en Amper-hora [Ah] o en términos de energía [kWh] y el uso particular de cada usuario. Muchos modelos traen incorporados las modalidades de carga rápida y lenta o en corriente tipo CC (corriente continua) y CA (corriente alterna), respectivamente, así como también una serie de tipos de cargadores disponibles según el lugar de fabricación y destino de venta.



Figura 2.4: Modelos de vehículos 100 % eléctricos: Hyundai Ioniq - BMW i3 - Tesla Model S.

2.2.1. Partes del vehículo eléctrico

Como ya se ha mencionado, un vehículo 100 % eléctrico posee una menor cantidad de piezas fundamentales para su funcionamiento si se le compara con un motor a combustión interna. Las principales partes para el funcionamiento electromecánico son las siguientes [10]:

- **Cargador:** encargado de transformar la corriente alterna, tomada de un punto de recarga de conexión trifásica o monofásica, y transformarla a corriente continua.
- **Batería:** es el sistema de almacenamiento de la energía destinada a alimentar al motor eléctrico, ya sea conectada directamente o mediante un inversor.
- **Inversor:** encargado de suministrar energía desde la batería hacia el motor, en el caso que éste sea de corriente continua. Otra de sus funciones es cargar la batería cuando el motor está actuando como generador de energía en la regeneración.
- **Convertor:** su función es cargar las baterías auxiliares del vehículo, utilizadas para alimentar componentes eléctricos y electrónicos auxiliares como lo son el aire acondicionado y la radio.
- **Motor eléctrico:** es el encargado de proporcionar el torque necesario para poner en movimiento al vehículo. Pueden ser de corriente continua o alterna. Éstos últimos se

han posicionado como la mejor opción respecto a los motores de corriente continua, pues poseen mayor eficiencia, alta densidad de potencia, bajo costo, mayor confiabilidad y libre de mantenimiento, según [11].

La siguiente figura muestra las principales partes electromecánicas del vehículo eléctrico.

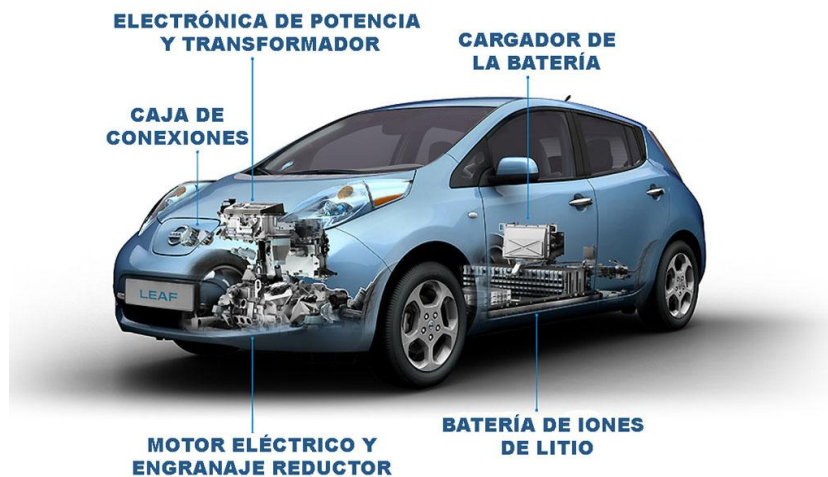


Figura 2.5: Partes Nissan LEAF 1era generación

2.3. Conceptos básicos en degradación de batería

Es importante dejar claro ciertos conceptos que guardan relación con el estudio de baterías. A partir de ellos son definidos cualidades y métricas que ayudan a entender su comportamiento.

1. **Estado de Salud (SOH: *State-of-Health*)**: representa el porcentaje de la capacidad que puede almacenar una batería en relación a la capacidad nominal entregada por el fabricante. Por lo general, se le relaciona con la degradación de la batería, es así que un SOH de 100 % representa una batería sana, mientras que un SOH de 0 % representa una batería totalmente degradada. En la práctica, una vez que la batería alcanza entre un 70 % y 85 % del SOH se considera degradada y en dicho caso se dice que el sistema de almacenamiento alcanzó su final de vida o por sus siglas en inglés EoL (*End-of-Life*).
2. **Estado de carga (SOC: *State-of-Charge*)**: está asociado al porcentaje de energía disponible en relación a la energía máxima que es capaz de entregar la batería. De esta manera, un SOC del 100 % indica que la batería está totalmente cargada, mientras que un SOC del 0 % indica que la batería ha alcanzado el fin de su descarga o *End-of-Discharge* (EoD).

3. **Profundidad de descarga (DoD: *Depth-of-Discharge*)**: representa la disminución del estado de carga, es decir, la diferencia entre el SOC inicial y el SOC final.
4. **Oscilación del estado de carga (SOC-Swing)**: hace alusión a la diferencia total entre el SOC inicial y el SOC final en un ciclo. Cabe mencionar que considera ciclos de carga y descarga.
5. **Rango de oscilación (SR: *Swing-Range*)**: Indica el rango en la que varía la oscilación del estado de carga. Es importante conocer esta métrica pues una oscilación del estado de carga de 40 %, puede tener un rango de oscilación de 60 % a 20 % o también de 100 % a 60 %.
6. **Definición de ciclo**: es un proceso de descarga hasta una nueva carga a cierto DoD.

2.4. Contexto de la investigación

El vehículo utilizado para pruebas de la actual investigación es un Nissan LEAF 2018 como el ejemplar mostrado en la figura 2.6, 100 % eléctrico, facilitado por la Agencia de Sostenibilidad Energética. Cuenta con una batería de 40 [kWh], modalidades de carga rápida y lenta e instalación de dispositivos electrónicos para telemetría.



Figura 2.6: Nissan LEAF 2018. Fuente: Manual Nissan LEAF 2018

Tabla 2.1: Datos principales reportados por el fabricante. Fuente: Manual Nissan LEAF 2018

| Datos Nissan LEAF 2018 | | |
|--------------------------|--------|-------|
| Masa | kg | 1.580 |
| Autonomía nominal | km | 240 |
| Energía batería | kWh | 40 |
| Potencia motor eléctrico | kW | 80 |
| Rendimiento | km/kWh | 6 |

En particular, la investigación llevada a cabo considera la toma de datos para la caracterización del uso energético y degradación de la batería del vehículo previamente presentado, además de la obtención y discusión de resultados. La disponibilidad del vehículo depende de la Agencia de Sostenibilidad Energética, la que realiza un gran esfuerzo para destinar el mayor tiempo posible a la investigación, monitoreo a través de telemetría y enseñanza del vehículo a la comunidad. De ello surge la moción de investigar el comportamiento del vehículo frente a diversos escenarios.

El monitoreo del vehículo se realiza mediante telemetría con el objetivo de registrar diversas variables mecánicas y eléctricas en tiempo real. Actualmente muchas empresas incorporan estas tecnologías con el fin de llevar un seguimiento de flotas de diversos vehículos, ello contribuye, entre otras cosas, a entender su comportamiento energético y ayuda a tomar futuras decisiones de carácter estratégico. Muchas de esas decisiones guardan relación con el consumo energético y gasto monetario que significa cargar la batería. El vehículo disponible tiene instalado un dispositivo de scanner automotriz OBD2 como el que se muestra a continuación y un teléfono móvil con la instalación de la aplicación LEAF Spy.



Figura 2.7: Scanner automotriz OBD2.

2.5. Literatura y metodologías de investigación

El consumo energético del vehículo eléctrico está basado en la cantidad de energía eléctrica que emplea en movilizarse. Es posible dividir en dos partes el consumo, por un lado la energía necesaria para cargar la batería y por otro, la manera en que fue descargada, es decir, la energía empleada en mover el vehículo. Respecto a la primera, es posible cargar en regímenes de carga lenta o rápida y a diversas potencias, en cuanto a la segunda la variación de energía empleada en movilizar el móvil depende de su uso, caracterizada por perfiles de velocidad, intensidad de corriente, potencia eléctrica, potencia mecánica, altitud, temperatura de las celdas de la batería, entre otros.

Respecto a las metodologías para cuantificar el consumo energético, uno de los procedimientos basales de este tipo de estudios es el registro del estado de carga (SOC) antes y después de cargar la batería, y el SOC final, posterior al uso del vehículo. Otras estrategias de investigación es la aplicación de modelos energéticos que son capaces de calcular la variación temporal del SOC, ellos consideran características particulares del vehículo y las principales pérdidas energéticas que se dan en el flujo de energía entre la batería y las ruedas motrices. Muchos modelos están basados en la relación que existe entre las fuerzas que dominan la dinámica del vehículo (tracción, roce dinámico, roce aerodinámico y peso) y de ella se establecen relaciones mediante expresiones algebraicas de acuerdo a energía y potencia. Algunas de las relaciones que es posible obtener con la aplicación de estos modelos son los mostrados en la figura 2.8, ellas exhiben la variación temporal de la velocidad, potencia en la batería y SOC. Finalmente, el freno regenerativo ha sido un constante desafío en cuanto a caracterizarlo, desde cuantificar a través de un porcentaje fijo de la energía perdida por disminución de energía cinética, hasta el planteamiento de modelos exponenciales [12].

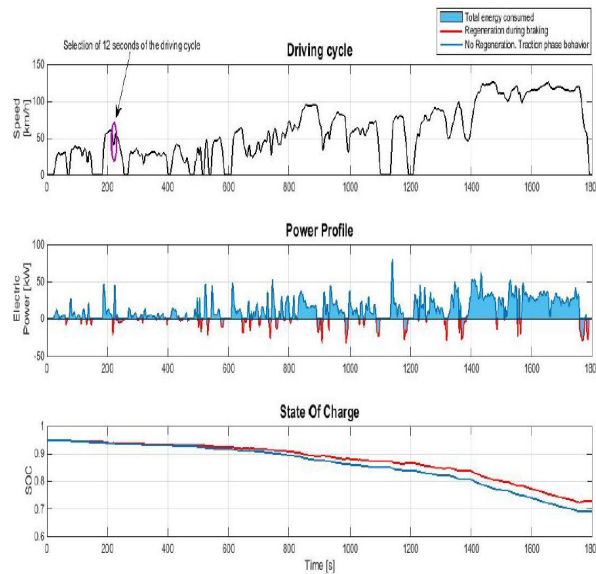


Figura 2.8: Perfiles de velocidad, potencia y estados de carga de un caso de estudio. Fuente: Fiori et al. (2016)

El consumo energético depende, entre otros aspectos, del uso particular y estilos de conducción, ello ha sido estudiado por años en tecnologías de vehículos a combustión interna y toma como punto de partida los perfiles temporales de velocidad, aceleración y tirón (*jerk* en inglés). Además, considera el análisis de dichas señales en el dominio de las frecuencias aplicando la transformada de Fourier y con ello es posible definir métricas para cuantificar el estilo de conducción. Cabe destacar que dichos estudios pueden ser validados para la investigación en vehículos eléctricos ya que la agresividad con que se conduzca un móvil implica un mayor estrés de la batería y hace posible relacionar variables energéticas con las métricas del estudio de degradación de la batería. En particular, estudios publicados por la SAE detallan una investigación, introduciendo la métrica *Ripple Aggressiveness* que da un alcance cuantitativo de la agresividad del conductor.

La degradación de las baterías es un proceso degenerativo que impacta en la disminución de la cantidad de energía que puede entregar un dispositivo de almacenamiento. Una de las formas de cuantificar esta característica es a través del SOH (*State Of Health*), métrica que representa el porcentaje de la capacidad que puede entregar la batería respecto a su capacidad nominal, reportada por el fabricante. Uno de los consensos ampliamente utilizados en electromovilidad es considerar que una batería se encuentra degradada y en condiciones para ser removida o reutilizada en otra aplicación cuando su SOH se encuentra entre 70-85 % [13], por ejemplo Nissan recomienda realizar el cambio de batería al 70 % de capacidad según [14].

Los modelos de degradación son variados y a lo largo de los últimos años han dedicado sus investigaciones en la estimación de curvas de extrapolación de la capacidad de la batería en función de ciclos de descarga. Cada cual considera variables de interés tales como la temperatura de la batería y ambiental, condiciones de manipulación, intensidad de corriente constante y variable, eficiencia Coulombica, entre otras. Ejemplos de estos modelos son los propuestos por Ning y Popov [15] (2004), controla la profundidad de descarga (DoD); Ning [16] (2006) propone un modelo basado en la pérdida de iones activos de litio; Berecibar [17] (2016) a través de modelos experimentales y adaptativos, el primero considera la combinación de datos históricos y conocimiento experto, el segundo ajusta parámetros que determinan la estimación de la curva de capacidad. Williard [18] (2017) considera datos del estado de carga teniendo en cuenta el largo de la constante de tiempo (CCCT) y la constante de tiempo de voltaje de carga (CVCT), determinando que un aumento de la CVCT provocaba una disminución de CCCT. Finalmente, Perez [19] (2018) con la publicación llamada *”Characterization of the degradation process of lithium-ion batteries when discharged at different current rates”*, plantea y valida un modelo basado en la variación de C_{rate} en el tiempo y cómo el modelo exponencial presentado se ajusta a los datos experimentales, además de una simulación de Monte Carlo para escenarios aleatorios de valores de C_{rate} . Parte de dichos resultados son mostrados en la figura 2.9.

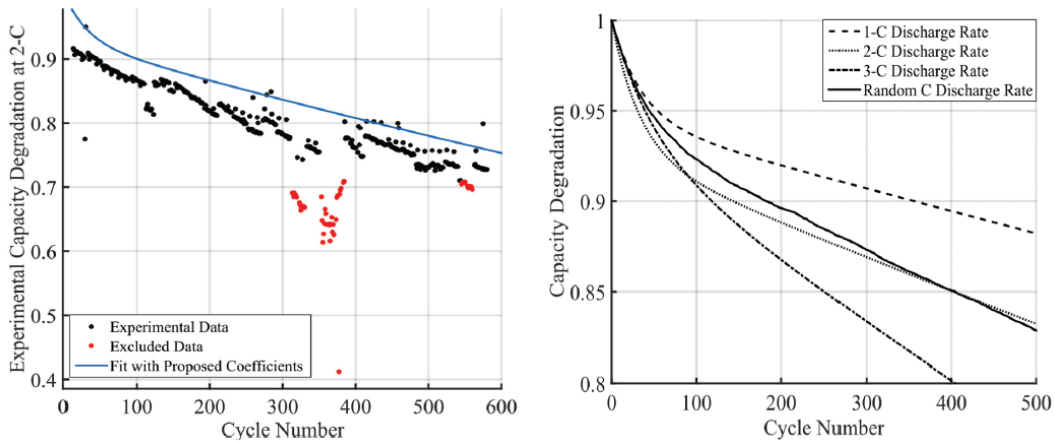


Figura 2.9: Gráficas de la evolución por ciclos de la capacidad en diferentes experimentos. Fuente: Pérez et al. (2017).

Capítulo 3

Descripción de modelos

La presente investigación considera modelos de tipo físico y matemático, basados en la literatura competente a estudios de electromovilidad y tecnología de sistema de almacenamiento, específicamente de baterías de ión-litio. A continuación se describen los modelos implementados en los tres grandes tópicos del trabajo de título, relacionados con:

- Caracterización energética del sistema de almacenamiento y propulsión del vehículo eléctrico.
- Cuantificación de la agresividad en la conducción y relación con el consumo energético del vehículo eléctrico.
- Degradación de la batería según modelos basados en profundidades de descargas en diversos regímenes.

3.1. Modelo de caracterización energética del sistema de almacenamiento

Estudiar las variaciones energéticas del vehículo Nissan LEAF 2018 forma parte de uno de los objetivos principales de la presente investigación, pues es necesario desglosar las fuentes de pérdida y ganancia de energía que experimente la batería del móvil. Se entiende por variaciones energéticas a todas aquellas demandas y recuperaciones que provengan o se dirijan, respectivamente, a la fuente de energía del vehículo. De esta manera, el enfoque dado a la investigación es el estudio de las diversas potencias mecánicas que enfrenta la dinámica del vehículo, encontrándose las siguientes:

- Potencia por tracción: asociada a la aceleración del vehículo.
- Potencia por resistencia aerodinámica: asociada a la fuerza que genera el aire, oponiéndose al movimiento del móvil.
- Potencia por roce en rodadura: proviene de la interacción de los neumáticos con el piso y se opone al movimiento del vehículo.

- Potencia por gravedad: surge en los momentos en que la pendiente que enfrenta el vehículo es distinta de cero. Así la gravedad suma una componente en favor o en contra del movimiento del cuerpo.

Como literatura base se considera el trabajo realizado en [20]. Dicha investigación detalla el análisis de las potencias mecánicas descritas anteriormente y caracteriza una potencia neta para diversos componentes por los que se transfiere la energía. Dichos componentes son: ruedas, transmisión, motor eléctrico y batería. De esta forma, los flujos de energía quedan relacionados a través de eficiencias, dadas las pérdidas que se tienen al transformar energía mecánica (torque) a energía eléctrica, por ejemplo. Otro punto importante que rescata la literatura en cuestión es la consideración de un modelo de regeneración para los instantes de tiempo en que el torque hacia las ruedas es negativo, es decir, cuando la energía se transfiere desde las ruedas motrices hasta la batería. Finalmente, el principal punto de comparación para la validación del modelo de potencias es el error simple y cuadrático entre el estado de carga que registra la aplicación de telemetría utilizada en el vehículo eléctrico y el estado de carga calculado por el modelo de potencias.

3.1.1. Modelo de consumo energético basado en potencias

El modelo de consumo energético basado en potencias, CPEM por sus siglas en inglés *Comprehensive Power-based EV consumption Model*, requiere velocidad, altitud y características del vehículo. Entrega principalmente el consumo energético (ce) en [kWh/km], la potencia consumida en [kW] y el estado de carga de la batería eléctrica.

La formulación para el modelo general de potencias se muestra a continuación y considera la potencia en las ruedas para un instante de tiempo t .

$$P_{ruedas} = \left(ma(t) + mg\cos(\theta) \cdot \frac{C_r}{1000}(c_1v(t) + c_2) + \frac{1}{2}\rho_{aire}A_{ve}C_Dv^2(t) + mgsin(\theta) \right) \cdot v(t) \quad (3.1)$$

La expresión anterior considera la masa como la suma de la masa promedio del vehículo (1569,5 [kg]) [21], masa de los ocupantes y masa por equipaje. La aceleración $a(t)$ calculada discretamente con los datos de posición en el tiempo de los datos de telemetría. La aceleración gravitacional $g = 9,81 [m/s^2]$, θ es la inclinación que percibe el vehículo en su trayecto, $C_r = 1,75$, $c_1 = 0,0328$ y $c_2 = 4,575$, son parámetros de resistencia a la rodadura variables en función del tipo de superficie del camino [22]. La densidad del aire $\rho = 1,25 [kg/m^3]$, $A_{ve} = 2,32 [m^2]$ [21] es la sección frontal del vehículo, $C_D = 0,28$ es el coeficiente de arrastre aerodinámico [23] y finalmente $v(t)$ es a velocidad del vehículo en [m/s] obtenida al igual que la aceleración de manera discreta por las siguientes expresiones [24].

$$v_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t} \quad (3.2)$$

$$a_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (3.3)$$

La potencia en el motor eléctrico (P_{motor}) es calculada a partir de la potencia en las ruedas, P_{ruedas} , considerando las eficiencias del eje de tracción $\eta_{traccin} = 0,92$ [25] y motor $\eta_{motor} = 0,91$ [26]. La potencia en el motor eléctrico resulta positiva cuando el flujo de energía va desde la batería hacia las ruedas, en caso contrario es negativa y el motor actúa como un generador de energía (freno regenerativo). Dicha recuperación energética tiene asociada una eficiencia de freno regenerativo, η_{rb} , calculada en la condición de potencia en el motor eléctrico $P_{motor} < 0$ y será explicada en detalle más adelante. De esta forma se define la potencia al motor negativa, por la siguiente ecuación:

$$P_{motor-neg} = \eta_{rb} \cdot P_{motor} \quad (3.4)$$

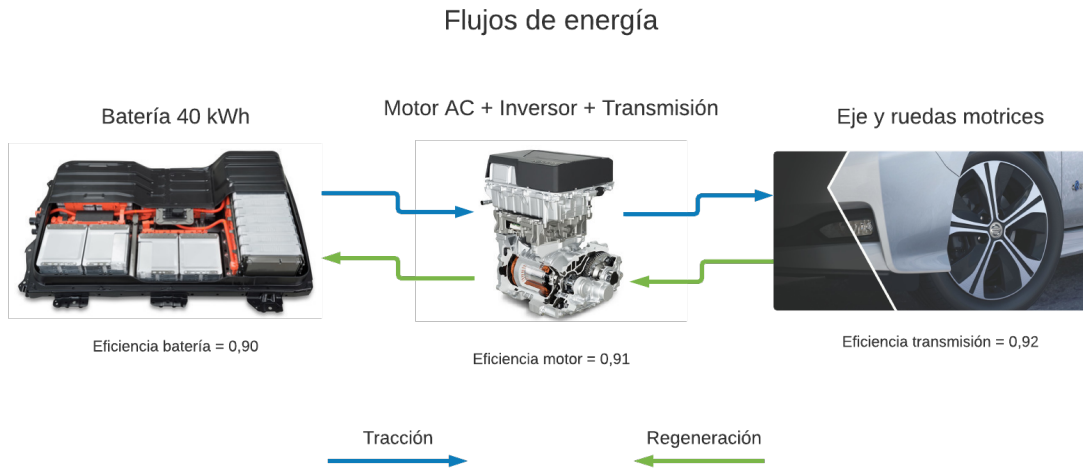


Figura 3.1: Esquema del flujo de energía y eficiencias del vehículo eléctrico. Elaboración propia.

Haciendo uso de las variables ya definidas, es posible estimar el estado de carga (SOC) final del vehículo, usando la siguiente ecuación:

$$SOC_{final} = SOC_{inicial} - \sum_{i=1}^N \Delta SOC_i(t) \quad (3.5)$$

$$\Delta SOC_i(t) = SOC_{i-1}(t) - \frac{P_{motor-neto_i}(t)}{3600 \cdot Cap_{bat}} \quad (3.6)$$

Con $P_{motor-neto_i}$, la potencia eléctrica consumida considerando una eficiencia de batería, $\eta_{bateria} = 0,90$ y Cap_{bat} es la capacidad de la batería medida en [Wh]. Finalmente, el consumo de energía queda definido usando la siguiente expresión:

$$CE \left[\frac{kWh}{km} \right] = \frac{1}{3600000} \cdot \frac{1}{d} \cdot \sum_{i=1}^N P_{motor-neto_i} \cdot \Delta t \quad (3.7)$$

Con d la distancia total de un recorrido en [km] y Δt el paso de tiempo entre registro de datos igual a $1/f$ con f correspondiente a la frecuencia de muestreo y su valor se encuentra entre 0.1 y 0.2 [Hz].

3.1.2. Eficiencia del freno regenerativo η_{rb}

El siguiente apartado tiene por objetivo identificar una relación para calcular la porción de la energía de frenado total disponible sobre la energía que realmente fue recuperada por regeneración por medio de la eficiencia del freno regenerativo η_{rb} :

$$\eta_{rb} = \frac{E_{recuperada}[kWh]}{E_{disponible}[kWh]} \quad (3.8)$$

$$E_{disponible}[kWh] = \sum_{i=1}^N P_{ruedas_i}^{(-)} \cdot \Delta t \quad (3.9)$$

$P_{ruedas_i}^{(-)}$ corresponde a la porción de potencias negativas calculadas con la ecuación 3.1 en cada paso de tiempo caracterizado por Δt . De esta manera, cuando $P_{ruedas} > 0$ indica que la energía fluye desde el motor a las ruedas motrices (modo tracción), en este caso la potencia de freno es cero. Cuando $P_{ruedas} < 0$, la energía fluye desde las ruedas motrices al motor (modo regeneración).

Finalmente obtener $E_{recuperada}[kWh]$ para cada paso de tiempo, se despejada de la ecuación 3.6 y la eficiencia de freno regenerativo queda determinada por el modelo propuesto por [12] y es función de la aceleración para cada paso de tiempo, según la siguiente expresión:

$$\eta_{rb} = \begin{cases} \left[e^{\left(\frac{0.0411}{a(t)} \right)} \right]^{-1} & \text{si } a(t) < 0 \\ 0 & \text{si } a(t) \geq 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

3.2. Modelo de cuantificación de la agresividad en la conducción

El siguiente modelo presenta un método basado en el análisis de Fourier de perfiles de agresividad a partir de la velocidad, tomado del estudio publicado por la SAE internacional, "Quantification of Drive Cycle's Rapid Speed Fluctuations using Fourier Analysis" [27].

Dicho estudio busca dar una mirada cuantitativa al análisis del consumo energético de un vehículo en condiciones particulares de conducción, en función del tipo de conductor. Para ello el estudio propone una métrica llamada *Ripple Aggressiveness* (RA) con el objetivo de cuantificar las fluctuaciones de los perfiles de conducción, como velocidad y *jerk* (tirón o jalón), en un ciclo de conducción. Para ejemplificar preliminarmente la métrica, si se tiene un RA alto en comparación a otro, significa que el estilo de conducción fue más agresivo.

La principal herramienta matemática utilizada es la transformada de Fourier. Su implementación se basa en la interpretación alternativa en el dominio de las frecuencias que es posible realizar. De ella se desprenden variaciones y diferencias en amplitudes para los rangos de bajas y altas frecuencias que ayudarán a realizar un análisis en base a la metodología propuesta por el estudio considerado.

Cabe mencionar que la transformada de Fourier exige una función integrable, no expresamente continua, considerando que los datos obtenidos de la lectura de variables mecánicas y eléctricas del vehículo estudiado se realiza de manera discreta, con el supuesto de linealidad entre puntos de medición. En el anterior escenario es necesario definir una versión especial, de carácter discreto, de la transformada de Fourier, la cual se detalla a continuación:

3.2.1. Transformada de Fourier Discreta

El análisis de Fourier consiste en calcular la transformada de Fourier en su versión discreta (*Discrete Fourier Transform*) y su formulación se muestra a continuación:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (3.11)$$

Con la expresión anterior, una señal de largo N , por ejemplo velocidad, puede ser transferida desde el espacio temporal al dominio de frecuencias compuesta de un conjunto de N elementos oscilatorios sinusoidales, caracterizados por $X(k)$, los cuales contienen una magnitud y una fase inicial por cada oscilador, correspondiendo a la frecuencia digital ($\omega_{digital}$) de $\frac{2\pi k}{N}$. Así, la relación entre la frecuencia real en $[Hz]$ que será la utilizada en el estudio y la frecuencia digital es:

$$f_{real} = \frac{f_s}{2\pi} \omega_{digital} \quad (3.12)$$

Donde f_s es la frecuencia de muestreo de la señal estudiada. Debido al fenómeno de *Aliasing*, se tiene una frecuencia real máxima para la señal y corresponde a $f_s/2$. Por ejemplo para frecuencias de muestreo de 1 [Hz], el rango de frecuencias debe ser: $0 : 1/N : 1/2$.

Otra relación importante basada en el Teorema de Parseval y que vincula el espectro

temporal con el de Fourier es:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (3.13)$$

El lado izquierdo de la ecuación representa la energía de la señal finita en el dominio del tiempo y es igual a la energía en el dominio de las frecuencias normalizada por $1/N$. Cabe señalar que cada término del lado derecho caracteriza el periodograma o espectro de Fourier de la señal estudiada y el área bajo la curva aproxima la varianza de la señal en el dominio temporal, cualidad que es de gran ayuda en el estudio posterior del tratamiento de datos.

3.2.2. Procesamiento de los datos

Posterior a la obtención de los datos de manera discreta es importante tener conocimiento del paso de tiempo entre cada lectura, ya que es necesario que el conjunto de rutas a estudiar tengan una frecuencia de muestreo similar, con el objetivo de contar con rangos de frecuencias en el espectro de Fourier similares según la ecuación 3.12.

En segundo lugar, los perfiles de velocidad deben ser preprocesados con la eliminación de períodos de inactividad, es decir, lecturas con velocidad nula y el ajuste promedio de todos los datos restándole el valor promedio de la velocidad, excluyendo los datos de inactividad. Son mostrados los perfiles en bruto y preprocesado respectivamente.

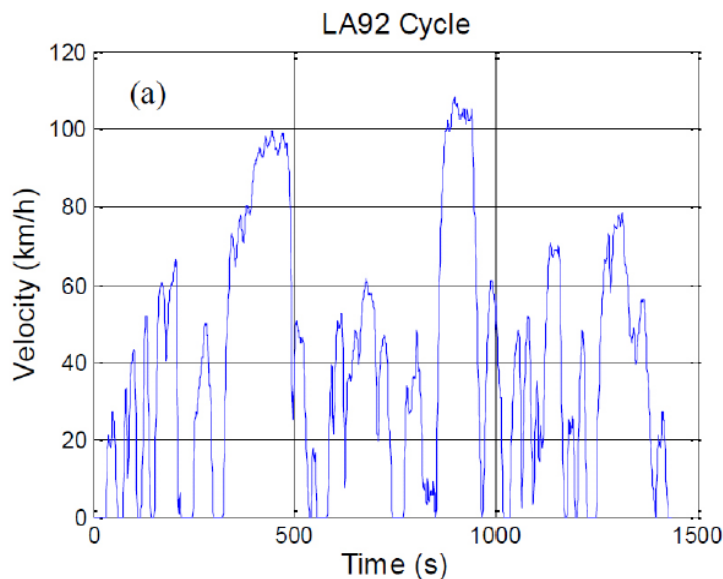


Figura 3.2: Ejemplar de un perfil de velocidad. Fuente: Liu et al. (2015).

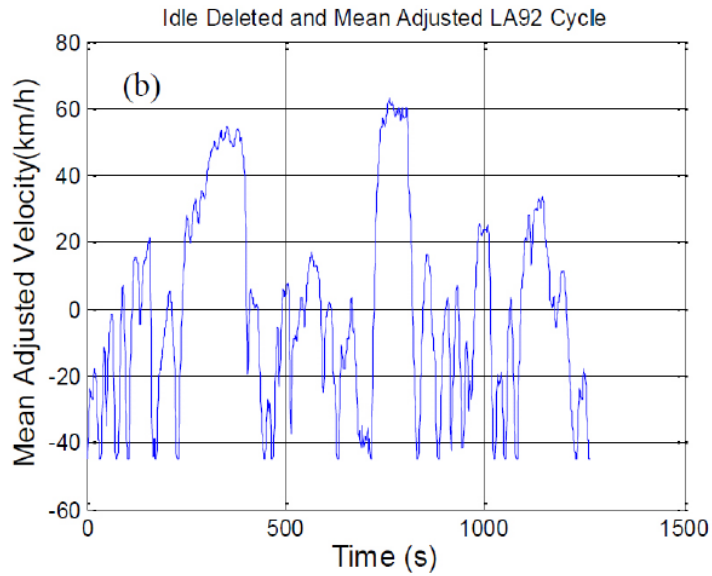


Figura 3.3: Ejemplar de un perfil de velocidad ajustado con el valor promedio y filtración de periodos de inactividad. Fuente: Liu et al. (2015).

El estudio menciona que los preprocesos descritos anteriormente no afectan a los resultados de la metodología para el cálculo de *Ripples Aggressiveness* [27].

Posteriormente se calcula la transformada discreta de Fourier, en la que los datos provenientes del dominio del tiempo son convertidos al dominio de las frecuencias. A continuación se muestra un ejemplo del espectro de Fourier de una de las rutas consideradas por el estudio referenciado.

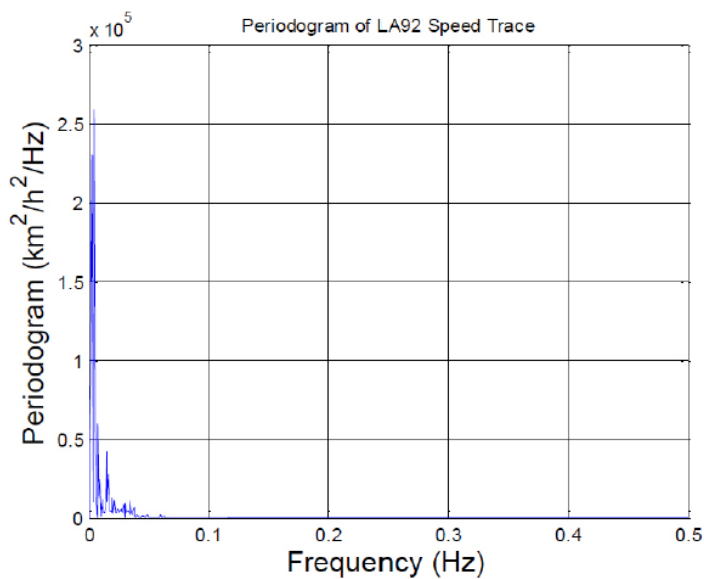


Figura 3.4: Espectro de Fourier de la señal de velocidad. Fuente: Liu et al. (2015).

Para cuantificar los componentes de baja y alta frecuencia a partir de los *peaks* del espectro de Fourier como se muestra en la figura 3.7, se implementa una metodología basada en el Teorema del Parseval, explicado en la sección 3.2.1. Ella consiste en satisfacer que cierto porcentaje del área bajo la curva del espectro de Fourier, que a su vez representa la proporción de la varianza del perfil de velocidades en el dominio del tiempo, cubra aspectos básicos y generales de estilos de conducción que los caracterizan. Dicha proporción se determina en base a la frecuencia de muestreo y rigurosidad con las que se quiere estudiar un conjunto de rutas. Vale decir, que cuando se habla de rigurosidad, no es necesario establecer una alta proporción para cubrir la varianza como condición de rigurosidad, sino mas bien depende de las características del estudio en particular y qué se busca analizar. Finalmente, la frecuencia que satisface dicha condición se denota como frecuencia de corte (*cutoff frequency*).

Particularmente, el estudio referenciado establece una proporción del 99 % y son determinados todas las frecuencias de corte para cada ruta. Se construye una gráfica de dispersión frecuencias de corte versus velocidad promedio del trayecto, tal como se muestra en la siguiente figura.

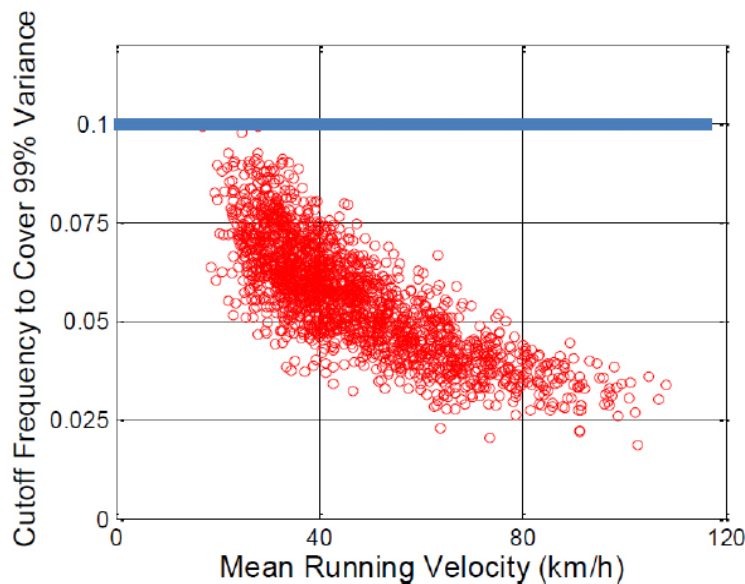


Figura 3.5: Gráfico de dispersión de la frecuencia de corte y velocidad promedio. Fuente: Liu et al. (2015).

De la figura anterior, se establece que todas las rutas pueden ser descritas a partir de características básicas de conducción con un 99 % de varianza cubierta. De esta manera queda determinada la frecuencia de corte ($0,1[Hz]$) utilizada en el resto del estudio.

Los espectros de Fourier para los perfiles de velocidad, demostraron que es importante eliminar las tendencias armónicas de bajas frecuencias. Para ello se estudian los espectros para la aceleración, considerando los preprocesos descritos anteriormente. A continuación se muestra un ejemplar para la aceleración.

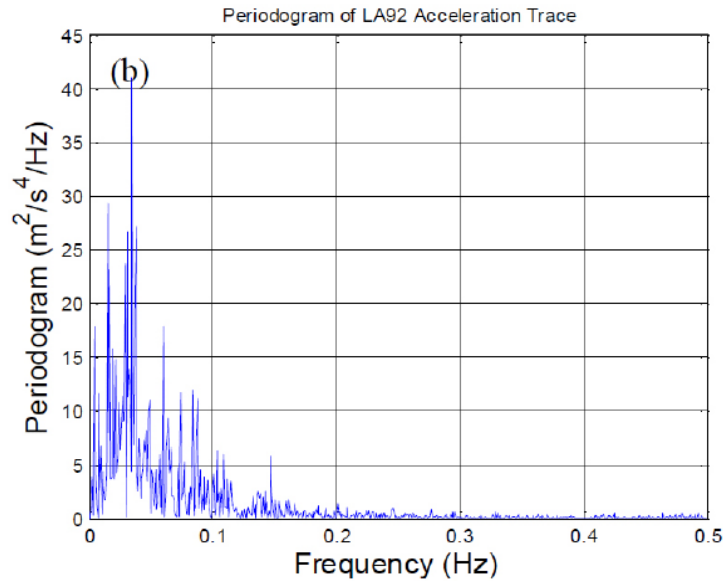


Figura 3.6: Espectro de Fourier de una señal de aceleración. Fuente: Liu et al. (2015).

Es posible notar que aun hay tendencias armónicas para bajas frecuencias, por lo que sigue un estudio de los espectros de Fourier de los perfiles de *jerk*, mostrando que los patrones no deseables en bajas frecuencias desaparecen y los *peaks* se distribuyen en mayor proporción por todo el espectro de frecuencias. Ello se evidencia en la siguiente figura.

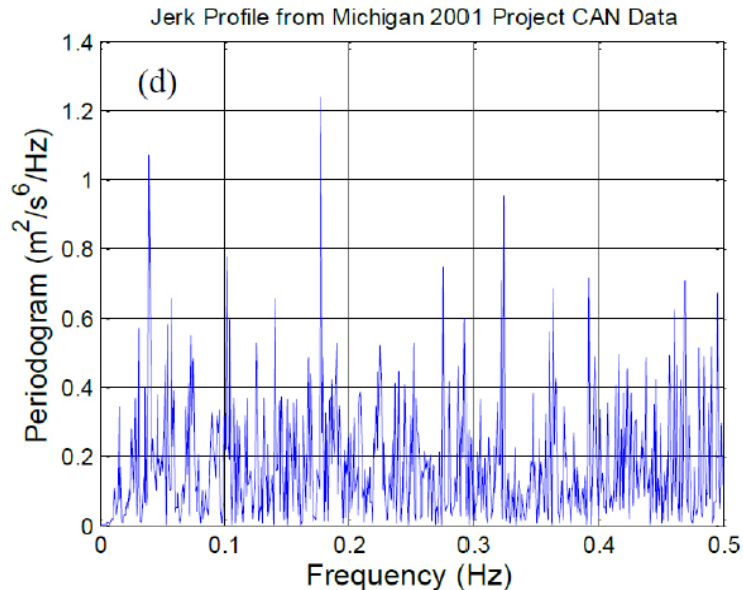


Figura 3.7: Espectro de Fourier de una señal de tirón. Fuente: Liu et al. (2015).

Finalmente, se establece que luego del estudio de dos derivadas para la velocidad, los cambios en las fluctuaciones de la rapidez pueden ser considerados que han sido separados

los estados de tendencia de tráfico, es decir, características típicas de la conducción y las características particulares de cada estilo de conducción que a su vez se encuentra fuertemente ligada al chofer del vehículo.

3.2.3. *Ripples Aggressiveness (RA)*

La métrica RA es la manera de cuantificar la variación del rango de bajas y altas frecuencias, separadas por la frecuencia de corte o *cutoff frequency* descrita en el apartado anterior. RA queda definido por la siguiente ecuación:

$$RA = \frac{AF}{BF + AF} \quad (3.14)$$

Donde BF es la suma de los *peaks* de bajas frecuencias y AF la suma de los *peaks* de alta frecuencia a partir de los cálculos de la transformada de Fourier discreta a la señal de *jerk*. La métrica queda normalizada entre 0 y 1.

Vincular la correlación que existe entre RA y el consumo eléctrico del vehículo se logra a partir de un gráfico de dispersión entre ambas variables.

Finalmente, cabe mencionar que el estudio referencia considera el estudio de vehículos convencionales, sin embargo la lógica es similar en vehículos eléctricos, pues se cambia el consumo de combustible por el consumo de energía eléctrica proveniente de la batería, lo cual lo hace aplicable al estudio de la presente investigación.

3.3. Modelo de degradación de la batería

A continuación es presentado un modelo basado en profundidades de descarga para la caracterización de la degradación en baterías de ion-litio. La literatura considerada lleva por nombre "*Modelling the Degradation Process of Lithium-Ion Batteries When Operating at Erratic State-of-Charge Swing Ranges*" [19] y su principal objetivo es cuantificar el número de ciclos a la que la batería es considerada degradada, según el porcentaje de capacidad perdida, a través de la profundidad de descarga y los estados de carga inicial y final. El modelo queda caracterizado por tres fases principales, en primer lugar la expresión general que describe la capacidad y su evolución por ciclos, luego la determinación de la eficiencia Coulombica y finalmente la corrección de este último a través de la determinación de factores de escala.

3.3.1. Método propuesto

El método propuesto busca caracterizar los ciclos de operación considerando la eficiencia Coulómbica, η_k . La expresión que relaciona la capacidad de un ciclo sucesivo con el anterior a través de la eficiencia Coulómbica es la siguiente.

$$E_{k+1} = \eta_k \cdot E_k \quad (3.15)$$

El modelo incluye una metodología que usa información de la batería, tales como la cantidad de ciclos operativos (reportado por el fabricante) y los valores de *SOC swing* y *Swing Range*, estos por lo general quedan definidos por ciclos de descarga con la batería totalmente cargada (*SOC inicial* = 100 %) hasta dejarla sin energía (*SOC final* = 0 %). También es necesario contar con el criterio de degradación en porcentaje y la cantidad de ciclos a dicho valor. Las variables anteriores caracterizan la eficiencia Coulombica y queda definido con la siguiente expresión.

$$\eta_k = (\%Degradacion)^{1/\#ciclos} \quad (3.16)$$

Dado que la mayoría de los ciclos de descarga no tienen la particularidad de iniciar con una batería totalmente cargada y terminar con una totalmente descargada, es que el modelo brinda la posibilidad de determinar la eficiencia Coulómbica corregida en función de el *SOC range*. A continuación son mostrados 11 opciones para tres casos de criterios de degradación (70 %, 80 % y 85 %) y sus factores de escala correspondientes.

| SR | Degradation Percentage | | |
|------------------|------------------------|------------|------------|
| | 0.7 | 0.8 | 0.85 |
| 100-0 | 1.000000 | 1.00000000 | 1.00000000 |
| 100-25 | 1.000003 | 1.00000266 | 1.00000193 |
| 75-0 | 1.000024 | 1.00001860 | 1.00001354 |
| 100-50 | 0.999989 | 0.99999203 | 0.99999420 |
| 75-25 | 1.000019 | 1.00001521 | 1.00001108 |
| 50-0 | 1.000037 | 1.00002874 | 1.00002093 |
| 100-75 | 1.000027 | 1.00002146 | 1.00001563 |
| 75-50 | 1.000011 | 1.00000881 | 1.00000642 |
| 62.5-37.5 | 1.000008 | 1.00000620 | 1.00000451 |
| 50-25 | 1.000043 | 1.00003347 | 1.00002438 |
| 25-0 | 1.000054 | 1.00004184 | 1.00003047 |

Figura 3.8: Factores de escala de acuerdo a porcentaje de degradación y rango de estado de carga. Fuente: Pérez et al. (2017).

Los factores de escala son usados como un multiplicador a la eficiencia Coulombica y representan un valor escalado a las condiciones reales del ciclo de descarga. En el caso que el *SOC range* no esté representado en alguno de las 11 opciones de la tabla anterior, se debe recurrir al gráfico de dispersión triangular mostrado en al figura 3.9, haciendo uso de SBM (*Similarity Based Model*) y la metodología de los 3 vecinos cercanos para la determinación de la aproximación de una eficiencia Coulombica.

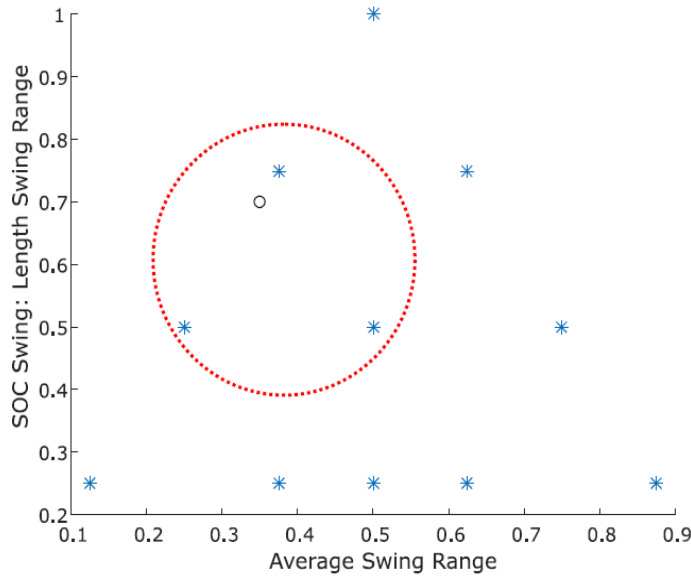


Figura 3.9: Gráfico de dispersión de los estados conocidos para promedio de rango de oscilación y oscilación del estado de carga. Fuente: Pérez et al. (2017).

La figura 3.9 ejemplifica el caso de un estado de carga inicial del 70 % hasta su total descarga. Así, el SOC range es 0.7 y el promedio entre ambos estados de carga 0.35. Encerrados en una circunferencia roja son señalados los 3 vecinos más cercanos, cada uno de ellos asociados a un factor de escala. El factor de escala requerido queda determinado por la ponderación de los factores de escala de cada uno de los 3 vecinos cercanos (mostrados en la figura 3.8) con el inverso de las distancias al punto en cuestión.

Capítulo 4

Metodologías

4.1. Metodología base de la investigación

La metodología base considera el estudio de una serie de rutas o trayectorias que comparten cierto grupo de características en común, descritas más adelante. Dichas rutas son divididas en 3 grandes grupos, clasificadas según su distancia recorrida:

1. **Rutas Cortas:** trayectos menores a 10 kilómetros
2. **Rutas Medianas:** trayectos entre 10 y 30 kilómetros
3. **Rutas Largas:** trayectos mayores a 30 kilómetros

Dicha clasificación surge a partir de separar rutas de tipo intraciudad, interciudad y combinadas, bajo la idea de caracterizar trayectorias comunes de ciclos de ciudad y autopista o bien determinadas sustancialmente por velocidades promedio bajas y altas, respectivamente.

De esta forma, las Rutas Cortas se encuentran caracterizadas por ser trayectos al interior de ciudad, las cuales poseen continuas detenciones y aceleraciones y atienden a las condiciones particulares del tránsito en grandes urbes. Las Rutas Medianas poseen trayectos combinados entre ciudad y autopistas de alta velocidad, y finalmente las Rutas Largas están constituidas principalmente por ciclos de alta velocidad y trayectos asociados a viajes entre ciudades.

Las rutas consideradas en el estudio fueron realizadas en distintas ciudades y localidades de la zona centro y sur del país. Preferentemente se llevaron a cabo en la ciudad de Santiago y dejando los viajes interciudad a urbes como Viña del Mar, Talca, Concepción, Chillan, entre otros.

Otra fuente de información que se busca con el estudio parcelado de las trayectorias es identificar posibles características comunes y entender el comportamiento del vehículo eléc-

trico en la realización de dichas rutas. Con ello se busca que la implementación de los modelos de caracterización energética, agresividad en la conducción y degradación de la batería sea posible establecer relación entre ellas.

La validación de un trayecto para ser considerada en el conjunto de rutas se realiza mediante el estudio de los datos por telemetría y su evaluación en el modelo de caracterización energética. El criterio de aceptación es la obtención de un error simple promedio menor al 5% entre el estado de carga reportado por telemetría y el calculado por el modelo en cada instante de tiempo. De no cumplirse dicha condición se reduce la cantidad de datos hasta obtener el error objetivo y se verifica la clasificación de la ruta según la nueva distancia recorrida por lo datos filtrados.

4.2. Modelo de caracterización energética del sistema de almacenamiento

El modelo de caracterización energética calcula principalmente el estado de carga e indicadores energéticos como el consumo eléctrico y rendimiento en kWh/km y km/kWh, respectivamente. La construcción del modelo se realiza en una planilla excel con parámetros de entrada provenientes de los datos por telemetría. El algoritmo se detalla a continuación.

1. Ingresar las columnas de datos de tiempo, posición y elevación en el tiempo.
2. Calcular velocidad y aceleración de manera discreta con las expresiones 3.2 y 3.3.
3. Calcular la potencia en las ruedas según la ecuación 3.1.
4. Calcular la energía en las ruedas ponderando por la ventana de tiempo entre registro de los datos de la telemetría.
5. Determinar la energía disponible para regeneración con la condición de energía en las ruedas negativa según la ecuación 3.9.
6. Calcular la eficiencia del freno de regeneración η_{rb} a través del modelo exponencial de la función definida por partes 3.10.
7. Cuantificar la energía recuperable a través de la ecuación 3.8.
8. Determinar la potencia y energía en la batería considerando eficiencias en la transmisión, motor y batería.
9. Calcular el estado de carga para cada paso de tiempo según la ecuación 3.6.
10. Cuantificar los errores simple y cuadrático medio.
11. Determinar el Rendimiento a partir de la distancia recorrida sobre la energía consumida

de la batería.

12. Calcular el consumo eléctrico y regeneración por unidad de distancia y tiempo.
13. Obtener gráfico para la evolución temporal del SOC calculado, SOC por telemetría y energía utilizada de la batería en kWh.
14. Elaborar gráfico del fraccionamiento energético y relaciones entre la energía regenerada, altimetría y perfil de velocidad.

4.3. Modelo de cuantificación de la agresividad en la conducción

Las variables de entrada son la velocidad, aceleración y tirón obtenidas del modelos de caracterización energética. Los anteriores son evaluados en un código en MATLAB (adjunto en el apéndice C) que entrega la frecuencia de corte y valor del *Ripples Aggressiveness* por cada ruta, sus pasos son detallados a continuación.

1. Ingresar datos de velocidad, aceleración y tirón.
2. Borrar los períodos de inactividad, es decir, apartar las muestras que contengan valores de la variable nula.
3. Realizar un ajuste promedio restando a todos los datos el promedio de la variable en cuestión.
4. Aplicar transformada de Fourier discreta según ecuación 3.11.
5. Calcular el área bajo la curva, sumando los rectángulos formador por los *peaks* de la señal de amplitud de la velocidad en el dominio de Fourier y la discretización de acuerdo al paso de frecuencia.
6. Iterar para cada área discreta acumulada hasta obtener un 90 % del área total y guardar en un vector auxiliar el contador que caracteriza a la frecuencia de corte.
7. Realizar los pasos anteriores a cada ruta.
8. Obtener gráfico de dispersiones de la frecuencia de corte versus la velocidad promedio de las rutas.
9. Determinar la máxima frecuencia de corte del gráfico anterior.
10. Aplicar transformada de Fourier discreta a la señal de *jerk* preprocesada según los pasos 2 y 3.
11. Calcular la suma de los *peaks* de la señal de *jerk* en los regímenes de bajas y altas frecuencias, separadas por la frecuencia de corte.

12. Calcular la métrica *Ripple Aggressiveness* para cada ruta.
13. Estudiar a través de gráficos de dispersión y factores de correlación la relación entre indicadores energéticos y *Ripple Aggressiveness*.
14. Analizar las relaciones anteriores por casos: caso 1: Todas las rutas. Caso 2: por Rutas Cortas, Medianas y Largas. Caso 3: excluyendo ciertas rutas.
15. El caso 3 se realiza haciendo un estudio estadístico de la relación entre el consumo eléctrico y *Ripple Aggressiveness*.
16. Determinar la ecuación de la recta que se ajusta a los datos dispersos.
17. Calcular las distancias euclidianas entre los puntos de la dispersión y la recta.
18. Determinar indicadores estadísticos: media aritmética, mínimo, máximo y desviación estándar.
19. Obtener histograma de las distancias.
20. Discriminar los puntos que poseen mayor diferencia con la tendencia, evidenciada en el estudio estadístico.
21. Excluir dichas rutas y obtener nuevos gráficos de dispersión y factores de correlación.

4.4. Modelo de degradación de la batería

A continuación son detallados las fases del método de investigación propuesto por la literatura descrita en el apartado 3.3 materializados en la programación de un código en MATLAB.

En primer lugar, el método exige definir el criterio y el número de ciclos de degradación de la batería y calcular la eficiencia Coulombica η_k según la ecuación 3.16. Luego se describen los pasos del algoritmo de MATLAB adjunto en el Apéndice E.

1. Transcribir los factores de escala según el criterio de degradación considerado.
2. Transcribir los valores de oscilación de rango (*swing range*) promedio y oscilación de estado de carga (*SOC swing*) de los valores conocidos descritos en la literatura.
3. Calcular la oscilación de rango y oscilación de estado de carga del estado (SOC inicial, SOC final).
4. Caracterizar la ubicación espacial del estado (SOC inicial, SOC final) en el gráfico de dispersión de los k vecinos más cercanos.
5. Calcular la distancia del estado (SOC inicial, SOC final) a todos los vecinos del gráfico

de dispersión.

6. Determinar las 3 menores distancias, guardando en un vector auxiliar los contadores perteneciente a dichos valores.
7. Calcular la distancia euclidiana del estado (SOC inicial, SOC final) y los 3 vecinos más cercanos.
8. Determinar el factor de escala objetivo a través de la ponderación del inverso de las distancias del punto anterior.
9. Corregir la eficiencia Coulombica a través de la ponderación con el factor de escala objetivo.
10. Iterar para cada ciclo calculando la capacidad según la ecuación 3.13.
11. Obtener gráficas de la evolución en función de los ciclos de la capacidad.
12. Calcular cantidad de ciclos hasta obtener un estado de salud del 70%.
13. Evaluar para el resto de las rutas.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Caracterización energética del sistema de almacenamiento

Se construye una tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de los tipos de rutas. El detalle de cada ruta se encuentra en el anexo A.

Tabla 5.1: Resumen de características e indicadores promedio de las rutas realizadas

| Indicador | Unidad | Rutas Cortas | Rutas Medianas | Rutas Largas |
|----------------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Distancia recorrida | km | 5,3 | 18,3 | 68,1 |
| Velocidad | km/h | 22,8 | 33,6 | 73,8 |
| SOC inicial | s/u | 79,2 % | 62,7 % | 86,8 % |
| SOC final | s/u | 77,2 % | 55,4 % | 53,7 % |
| ΔSOC | s/u | 2,0 % | 7,3 % | 33,1 % |
| Rendimiento | km/kWh | 8,2 | 7,1 | 5,1 |
| Consumo eléctrico | kWh/100km | 12,2 | 14,1 | 19,6 |
| Regeneración en distancia | kWh/100km | 5,0 | 3,9 | 1,2 |
| Regeneración en tiempo | kWh/h | 1,1 | 1,2 | 0,8 |
| Eficiencia de regeneración | s/u | 52,3 % | 67,3 % | 72,0 % |
| Error simple | s/u | 0,6 % | 0,9 % | 3,3 % |
| Error cuadrático medio | s/u | $3,7 \times 10^{-5}$ | $3,6 \times 10^{-5}$ | $7,7 \times 10^{-4}$ |

Como parte de las gráficas que es posible construir a partir del modelo de caracterización energética, son mostrados 4 ejemplares para cada ruta representativa del tipo de trayecto. Dicha representación se basa en la elección de una ruta que posea valores promedios cercanos a los que caracterizan a cada tipo de ruta.

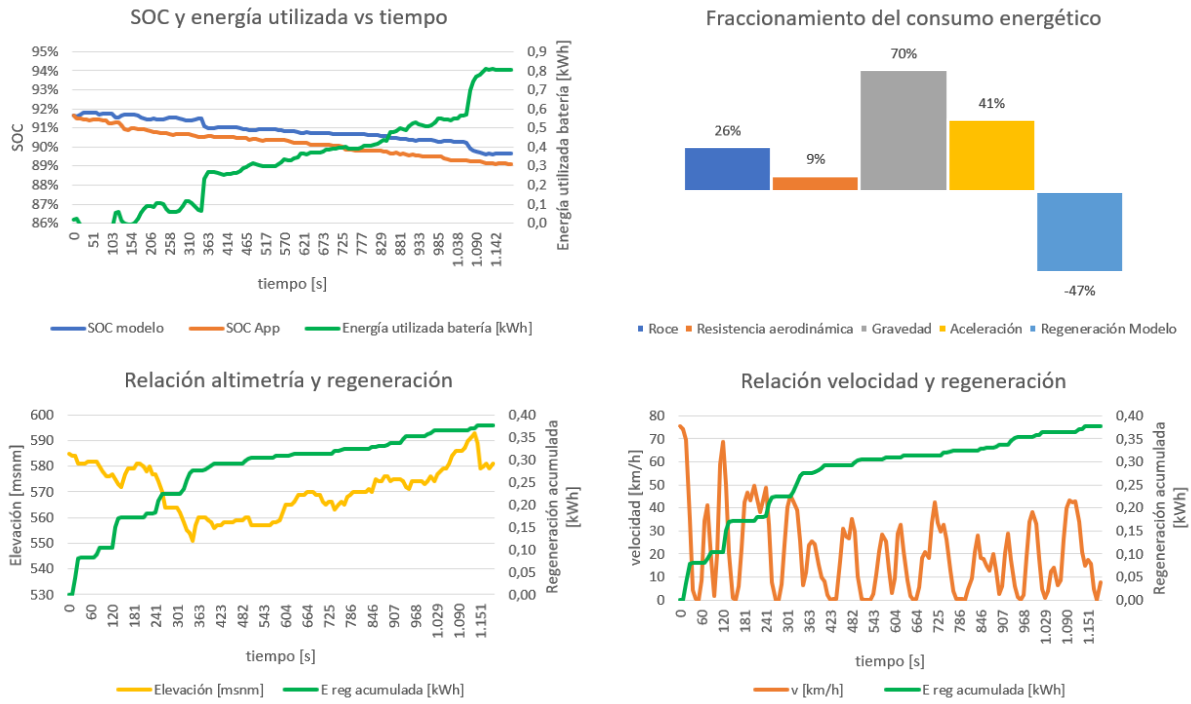


Figura 5.1: Gráficos caracterización energética para ruta corta C9

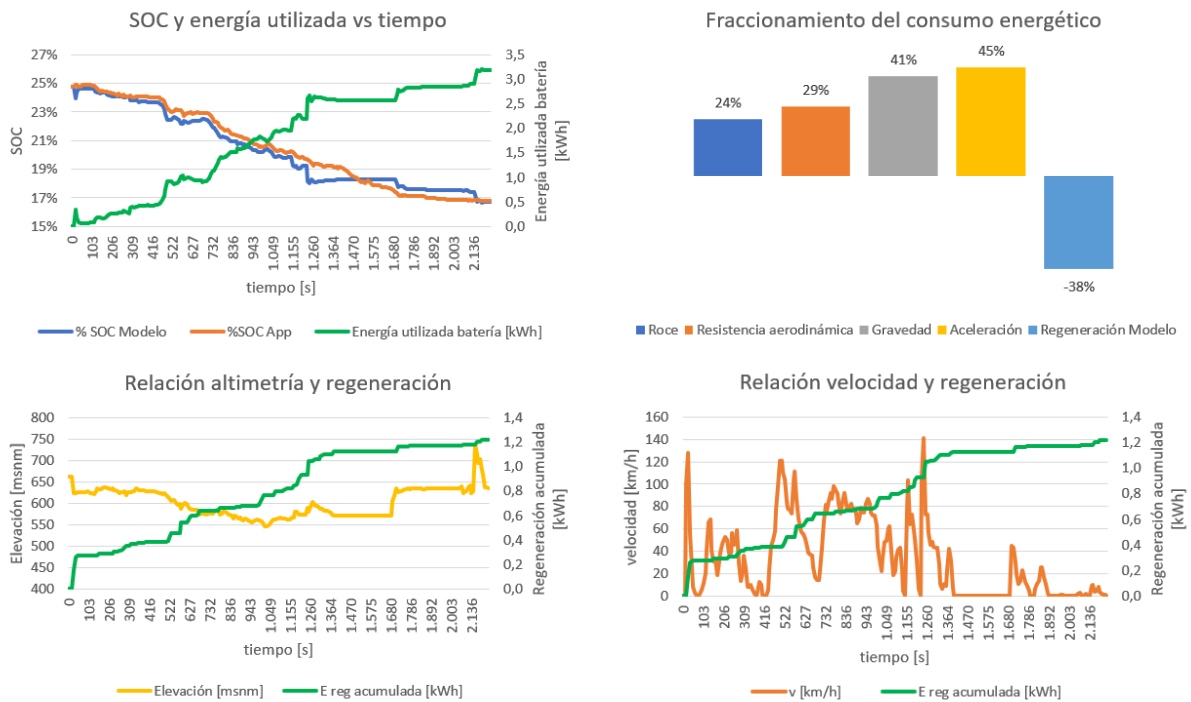


Figura 5.2: Gráficos caracterización energética para ruta corta M14

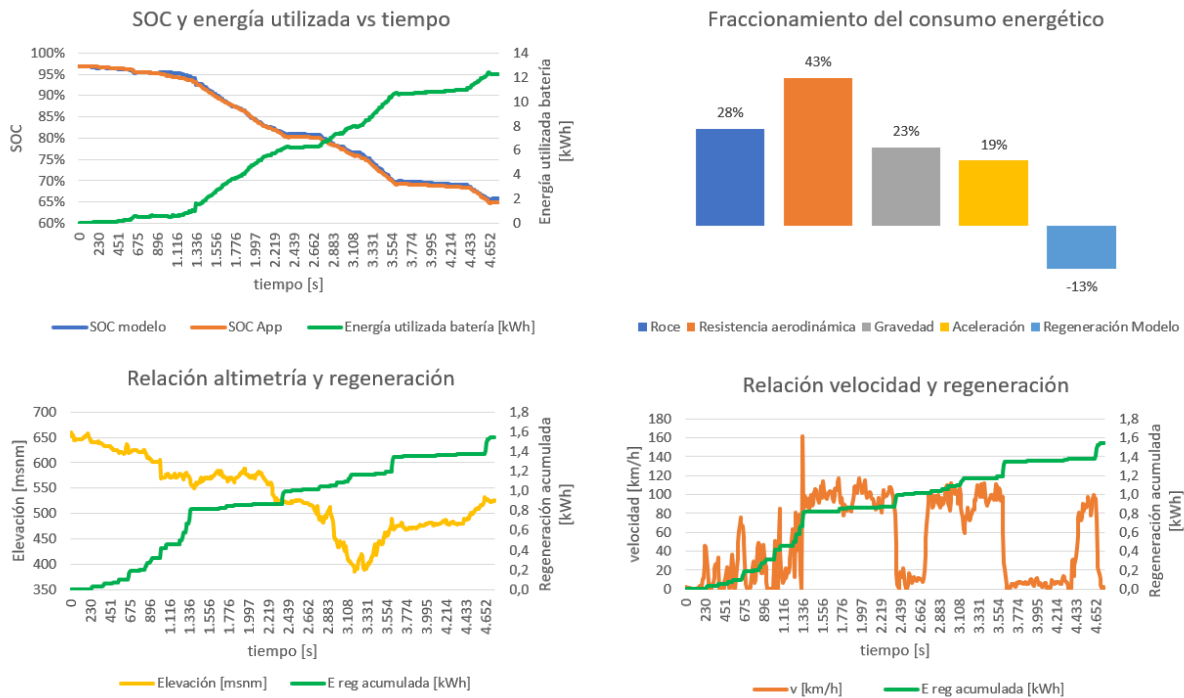


Figura 5.3: Gráficos caracterización energética para ruta corta L8

5.2. Cuantificación de la agresividad en la conducción y relación con indicadores energéticos

Son mostrados a continuación los gráficos de dispersión de frecuencia de corte vs velocidad promedio obtenidos considerando varianzas del 99% y 90%, y tabla resumen del estudio estadístico de esta última y *Ripple Aggressiveness*.

Las siguientes tablas dan cuenta de los coeficientes de correlación entre variables energéticas y *Ripple Aggressiveness* para los casos de estudio 1, 2 y 3, en conjunto con gráficos de dispersión de los casos 2 y 3 de Rutas Cortas.

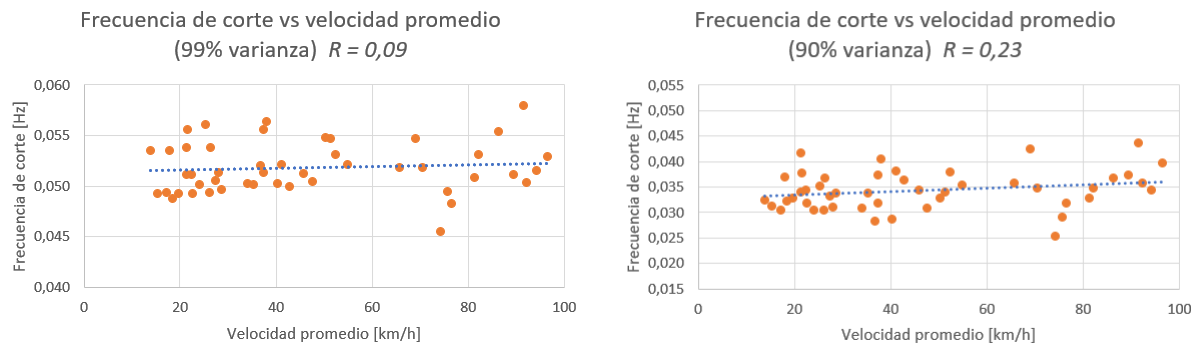


Figura 5.4: Gráficos de dispersión considerando varianzas del 99% y 90%.

Tabla 5.2: Resumen de indicadores estadísticos para frecuencia de corte al 90 %

| Frecuencia de corte al 90 % de varianza. | |
|--|-------|
| variable | valor |
| Promedio | 0,034 |
| Máximo | 0,044 |
| Mínimo | 0,025 |
| Desviación estándar | 0,004 |

Tabla 5.3: Resumen de indicadores estadísticos para resultados de *Ripple Aggressiveness*.

| <i>Ripple Aggressiveness</i> | |
|------------------------------|-------|
| variable | valor |
| Promedio | 0,076 |
| Máximo | 0,166 |
| Mínimo | 0,006 |
| Desviación estándar | 0,035 |

Tabla 5.4: Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para el caso 1 considerando la totalidad de las rutas.

| Todas las rutas: Correlación entre Indicadores energéticos y RA | | | | |
|--|-------------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| Caso | Consumo eléctrico | Rendimiento | Regeneración en distancia | Regeneración en tiempo |
| 1 | -0,12 | 0,08 | 0,07 | 0,05 |

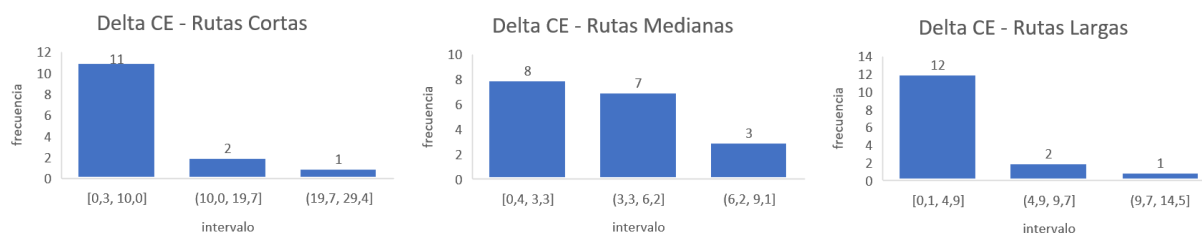


Figura 5.5: Histogramas de la distancia entre estados *ripple aggressiveness* - consumo eléctrico y su ajuste lineal.

Tabla 5.5: Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para los casos 2 y 3 de las Rutas Cortas.

| Rutas Cortas: Correlación entre Indicadores energéticos y RA | | | | |
|---|-------------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| Caso | Consumo eléctrico | Rendimiento | Regeneración en distancia | Regeneración en tiempo |
| 2 | -0,17 | 0,16 | -0,09 | 0,04 |
| 3 | -0,62 | 0,72 | 0,06 | 0,21 |

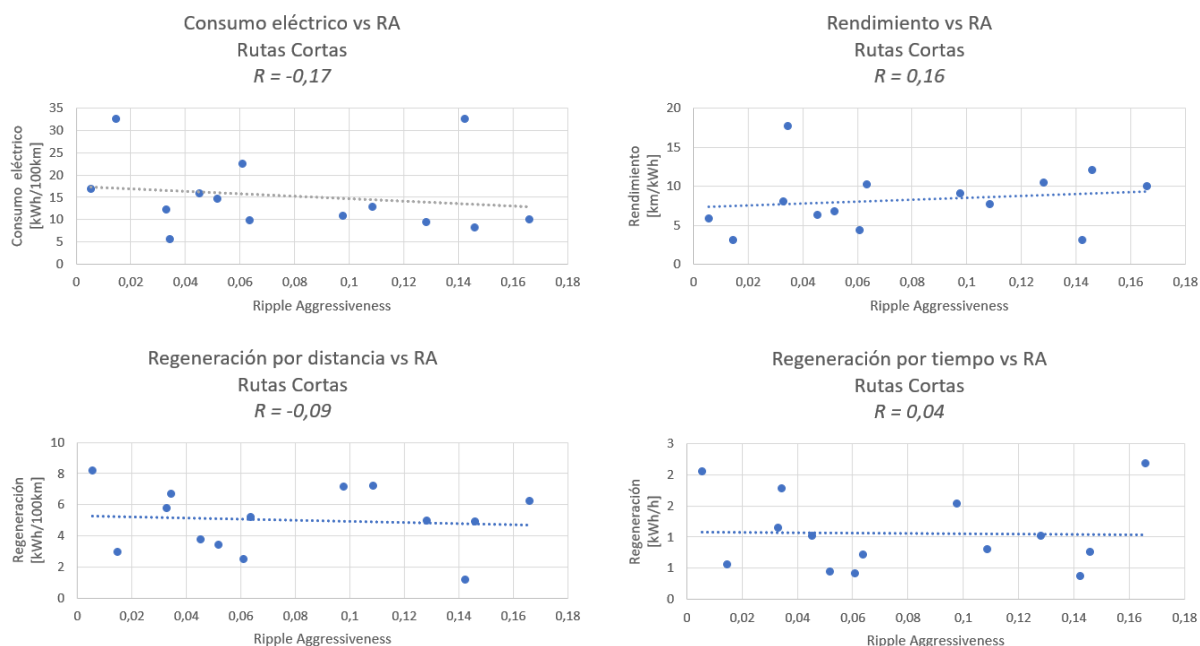


Figura 5.6: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y RA para el caso 2.

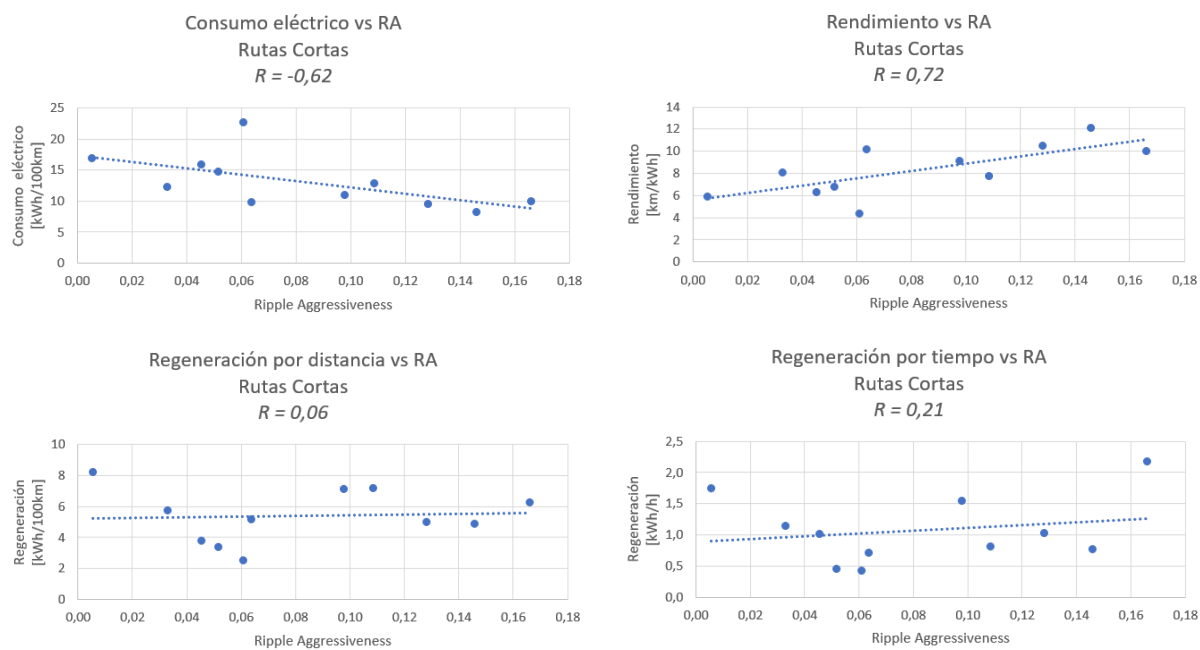


Figura 5.7: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y RA para el caso 3.

Tabla 5.6: Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para los casos 2 y 3 de las Rutas Medianas.

| Rutas Medianas: Correlación entre Indicadores energéticos y RA | | | | |
|---|-------------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| Caso | Consumo eléctrico | Rendimiento | Regeneración en distancia | Regeneración en tiempo |
| 2 | 0,25 | -0,32 | -0,02 | -0,17 |
| 3 | 0,16 | -0,26 | 0,10 | -0,07 |

Tabla 5.7: Coeficientes de correlación e indicadores energéticos para los casos 2 y 3 de las Rutas Largas.

| Rutas Largas: Correlación entre Indicadores energéticos y RA | | | | |
|---|-------------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| Caso | Consumo eléctrico | Rendimiento | Regeneración en distancia | Regeneración en tiempo |
| 2 | -0,18 | 0,10 | 0,36 | 0,31 |
| 3 | 0,04 | -0,08 | 0,41 | 0,33 |

5.3. Degradación de la batería

Son exhibidos una tabla resumen de los resultados de degradación, en conjunto con gráficas de la evolución temporal del número de ciclos al 70% de capacidad y los correspondientes al estudio de realización de rutas aleatorias. Finalmente, gráficos de dispersión con la adición de la métrica *Ripple Aggressiveness*.

Tabla 5.8: Resumen de indicadores estadísticos para número de ciclos.

| Estudio estadístico del número de ciclos al 70% de capacidad | | | |
|---|--------------|----------------|--------------|
| variable | Rutas Cortas | Rutas Medianas | Rutas Largas |
| Promedio | 2.849 | 2.956 | 2.705 |
| Máximo | 2.965 | 3.455 | 2.848 |
| Mínimo | 2.790 | 2.771 | 2.473 |
| Dev. estándar | 44 | 230 | 119 |

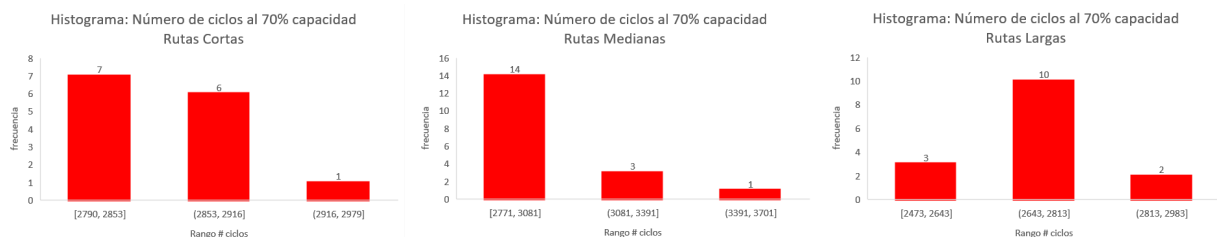


Figura 5.8: Histogramas de la cantidad en el número de ciclos según rangos para cada tipo de ruta.

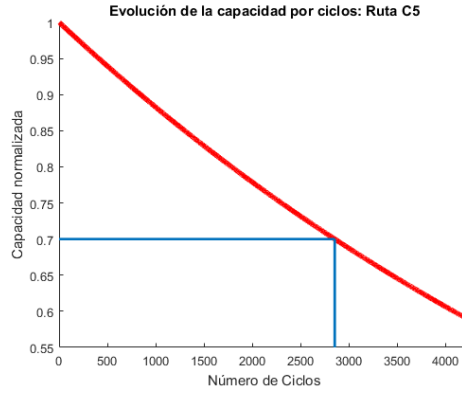


Figura 5.9: Evolución de la capacidad por ciclos Ruta Corta C5. Número de ciclos al 70 % de capacidad = 2.852.

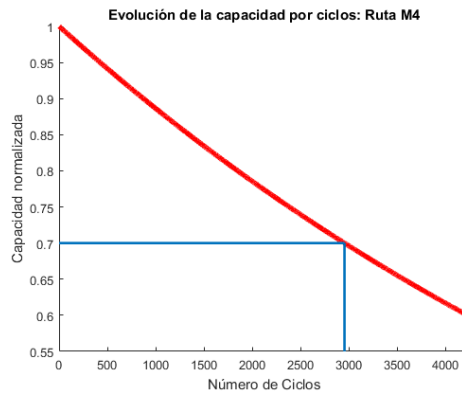


Figura 5.10: Evolución de la capacidad por ciclos Ruta Mediana M4. Número de ciclos al 70 % de capacidad = 2.953.

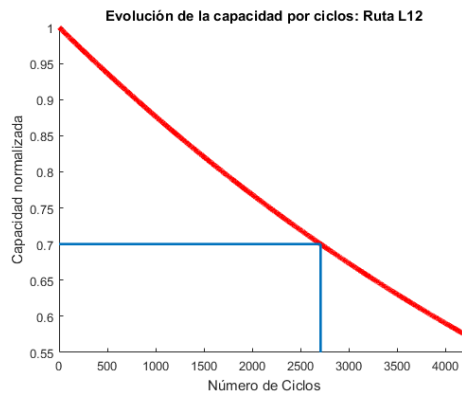


Figura 5.11: Evolución de la capacidad por ciclos Ruta Larga L12. Número de ciclos al 70 % de capacidad = 2.706.

Tabla 5.9: Estimación cantidad de ciclos al 70% de capacidad estudio de realización aleatoria de rutas.

| Variable | Indicador | Todas | Cortas | Medianas | Largas |
|--------------------|-----------|-------|--------|----------|--------|
| Cantidad de ciclos | \bar{X} | 2.835 | 2.848 | 2.941 | 2.700 |
| | σ | 2,2 | 1,3 | 3,8 | 3 |

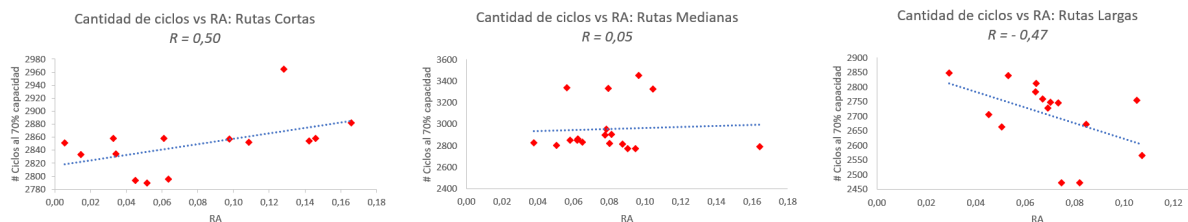


Figura 5.12: Relación entre variables *Ripple Aggressiveness* y cantidad de ciclos al 70% capacidad.

Capítulo 6

Análisis de resultados

A continuación son presentadas las evidencias e interpretaciones de los resultados obtenidos en las secciones 5.1, 5.2 y 5.3, correspondiente a los tres ejes principales de investigación. Cabe señalar que se realiza un análisis parcelado por resultados y se establecen relaciones entre ellas.

6.1. Caracterización energética del sistema de almacenamiento

A partir de la tabla resumen 5.1 es posible determinar que de acuerdo a las rutas realizadas:

- Se obtiene un aumento entre la diferencia de estados de carga inicial y final al aumentar la distancia recorrida. Ello evidencia que un aumento en la distancia recorrida implica un mayor uso de energía, es decir, la profundidad de la descarga será mayor.
- El rendimiento varía desde un valor máximo de 8,2 km/kWh para las Rutas Cortas, 7.1 km/kWh para las Rutas Medianas hasta 5,1 km/kWh para las de tipo Largas. Lo anterior establece diferencias entre las rutas, es decir, aquellas realizadas en recorridos de ciudad (Rutas Cortas preferentemente) tienden a recorrer mayor distancia por unidad de energía en comparación a los recorridos entre ciudades o bien aquellos trayectos realizados a mayores velocidades, caracterizadas en las Rutas Largas. Hay evidencia empírica de que el comportamiento anterior se explica bajo la posibilidad de regenerar mayor cantidad de energía, en particular las Rutas Cortas poseen la mayor regeneración por cada 100 km recorridos con 5 kWh/100km versus los casos de las Rutas Medianas y Largas con 3,9 y 1,2 kWh/100km, respectivamente.
- El consumo eléctrico, por su parte, posee un comportamiento contrario al de Rendimiento, pues un mayor consumo eléctrico implica un menor rendimiento y su variación entre rutas se explica por las mismas razones del caso de rendimiento, es decir, la posibilidad de regenerar una mayor cantidad de energía en comparación a otro tipo de rutas, desencadena un menor consumo eléctrico.
- La regeneración en distancia disminuye al comparar las rutas Cortas, Medianas y Lar-

gas, evidenciando que las Rutas Cortas poseen mayor potencial de regeneración en función de la distancia recorrida en desmedro de las rutas Medianas y Largas. Notar que ésta última posee un valor del orden de 5 y 4 veces menor que las rutas Cortas y Medianas, respectivamente. Posicionándolos como los trayectos de menor potencial de regeneración.

- Sin embargo, el análisis anterior no es análogo con el comportamiento de la Regeneración en tiempo, pues los resultados arrojan que los tres valores se encuentran cercanos a 1 kWh/h, es decir que la cantidad de energía regenerada es similar en promedio. Diferenciándose en el volumen de regeneración y la cantidad de tiempo que es posible recuperar energía.
- La eficiencia en la regeneración muestra que a medida que se estudian las Rutas Cortas hasta las Rutas Largas, su comportamiento es al alza, es decir, el potencial de energía que puede ser regenerado es mayormente aprovechable en las Rutas Largas. Esto puede ser explicado debido a la energía cinética perdida en trayectos como el de las Rutas Largas, ya que el potencial energético aumenta con el cuadrado de la velocidad haciendo más provechosa la recuperación en comparación a las Rutas Cortas. Por su parte, las Rutas Medianas se encuentran en una situación intermedia, aspecto esperable, pues la constituyen recorridos que combinan viajes al interior de una ciudad y conducción en autopistas.
- Finalmente el error simple para los 3 tipos de rutas se mantiene bajo el 5 %, como parte de la exigencia impuesta para la validación del modelo. Notar que su valor aumenta conforme aumenta la distancia recorrida de los tipos de rutas, lo que evidencia que el modelo se hace menos preciso.

De las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se desprende lo siguiente:

- Se observa una estrecha relación de cercanía y comportamiento de las curvas de SOC modelo y SOC App (telemetría) para los 3 ejemplares de cada tipo de ruta. Esto demuestra gráficamente la validación del modelo energético. Por su parte, las curvas de Energía utilizada batería, igualmente describen el comportamiento esperado y es posible relacionarlas con las curvas de SOC modelo y SOC App, a medida que aumenta la pendiente de la primera, las curvas de SOC decaen en mayor proporción, a su vez cuando la curva muestra descensos significa que existen regímenes de regeneración de energía y por lo tanto las curvas SOC presentan pendientes positivas.
- Respecto a los gráficos de barras del fraccionamiento del consumo energético, muestran importantes diferencias. Por un lado, el consumo por vencer la fuerza de gravedad se hace más notorio en las Rutas Cortas, en comparación a las Rutas Medianas y Largas, en que las fuentes de mayor consumo energético provienen de la aceleración y resistencia aerodinámica, respectivamente.
- Los gráficos que muestran la relación entre la altimetría y la regeneración evidencian que las principales alzas en las curvas de regeneración acumulada se presenta preferentemente en pendientes negativas del recorrido, dejando un menor potencial de regeneración a las zonas con pendiente nula o positiva.
- Por otro lado, las gráficas de la relación entre la velocidad y regeneración muestran que las alzas en la regeneración acumulada son más frecuentes en las Rutas Cortas, lo que se relaciona con el indicador de Regeneración en distancia y su estrecha conexión con

el aumento en el rendimiento del vehículo eléctrico. Otra evidencia es el importante aumento de la regeneración acumulada en los momentos en que el perfil de velocidades decae bruscamente como es posible observar el cambio de la velocidad para los instantes aproximados de 2440 [s] y 3600 [s] en el caso de la figura 5.3. Por el contrario, la tendencia de la curva de regeneración acumulada se aplanan cuando no hay cambios evidentes en el perfil de velocidades. El comportamiento anterior es más evidente en el caso de las Rutas Cortas.

6.2. Cuantificación de la agresividad en la conducción

Considerando las figura 5.4 y las tablas 5.2 y 5.3 es posible evidenciar:

- Los gráficos de dispersión muestran la tendencia entre los estados "velocidad promedio-frecuencia de corte" y ambos evidencian que se da una relación positiva, con mayor coeficiente de correlación para el caso de estudio de 90 % de varianza. Dicho aumento puede ser atribuido a la menor exigencia hacia la densidad de datos, pues una varianza de 99 % está considerada para el estudio base de frecuencias de muestreo de 1 [Hz] en comparación a la presente investigación (0.2 [Hz]), de esta forma es posible "rescatar" mayor información entre datos registrados.
- La tabla 5.2 muestra que el valor máximo de frecuencia de corte es 0,044 [Hz] y determina el cálculo de la métrica *Ripple Aggressiveness*. A su vez dichos valores se encuentran entre el rango 0,006 a 0,166.

De la figura 5.5 y tabla 5.4 es posible establecer:

- La tabla muestra que los coeficientes de correlación positivos se encuentran bajo 0,1 y el caso negativo presenta un valor de -0,12. Preliminarmente, el caso expuesto sugiere que la métrica RA se correlaciona positivamente con las variables Rendimiento, y Regeneración en distancia y tiempo. Sin embargo, dichos valores no muestran evidencia clara que las variables en cuestión se correlacionen fuertemente.
- La figura adjunta indica que los histogramas de las Rutas Cortas y Largas preferentemente se ubican en el primer rango. En el caso de las Rutas Medianas, la mayor cantidad de casos se distribuye en los primeros dos intervalos. De acuerdo a dichos comportamientos, fue tomada la decisión de filtrar las rutas pertenecientes a los rangos no señalados anteriormente.

Analizando las tablas 5.5, 5.6 y 5.7 además de las figuras 5.6 y 5.7 de desprende lo siguiente:

- Los casos de estudio 2 y 3 para las Rutas Cortas indican que hay un aumento en valor absoluto de los coeficientes de correlación para las variables Consumo eléctrico y Rendimiento de -0.17 a -0.62 y 0.16 a 0.72, respectivamente, ello sugiere correlaciones fuertes. Comportamiento contrario se observa para las variables Regeneración en distancia y en tiempo. Esto evidencia un mejor ajuste de los datos y su relación con cierta tendencia. En particular, los resultados señalan que un mayor grado de agresividad en la conducción propician un menor consumo energético, un mayor rendimiento y mayor

regeneración en tiempo.

- El caso 2 para las Rutas Medianas y Largas exponen un aumento en el coeficiente de correlación respecto al estudio del caso 1. Siendo las variables Consumo eléctrico y Rendimiento que presentan mayor aumento, para el caso de las Rutas Medianas, con valores de coeficiente de correlación 0,25 y -0,32, es decir que un mayor grado de agresividad en la conducción causa un mayor consumo eléctrico y un menor rendimiento. Para las Rutas Largas, se exhibe mayor correlación con las variables de Regeneración en distancia y tiempo, con valores de 0,36 y 0,31, respectivamente. De esta manera un mayor grado de agresividad en la conducción propiciaría mayor recuperación de energía por regeneración, tanto en distancia como en tiempo.
- Por el contrario los casos 3 de las Rutas Medianas y Largas no exhiben aumentos en valor absoluto de los coeficientes de correlación. Esto indicaría que los resultados no evidencian comportamientos generalizados, como los casos anteriormente analizados.

6.3. Degradación de la batería

Considerando la tabla 5.8 y 5.9, además de las figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 es posible evidenciar:

- El valor promedio para el número de ciclos al 70% de capacidad presenta un valor máximo para las Rutas Medianas, seguida de las Rutas Cortas y finalmente las de tipo Largas.
- Las tres estimaciones promedio anteriormente señalados poseen valores sobre los 200 ciclos sobre la cantidad base considerada (2.500 ciclos), en particular las Rutas Largas exhiben dicho comportamiento y hasta poco más de 450 ciclos para el caso de las Rutas Medianas, siguiendo el caso de las Rutas Cortas con caso 350 ciclos adicionales.
- El tipo de ruta que presentó menor dispersión entre sus resultados son las de tipo Cortas, con 44 ciclos de desviación estándar, mostrado gráficamente en el primer histograma de la figura analizada, pues la mayor cantidad de los resultados se ubican en los primeros dos rangos. A su vez, las Rutas Medianas presentaron mayor variabilidad respecto a su valor de desviación estándar con un total de 230 ciclos a pesar de que la mayor parte de los resultados se encuentran en el primer rango del histograma respectivo.
- Considerando las Rutas Largas, el histograma exhibe un comportamiento bastante simétrico, coincidiendo el valor promedio con el intervalo central. Lo anterior, lleva a generalizar el comportamiento de este tipo de rutas preferentemente al segundo intervalo. Análogo al resto de las rutas, el caso de las Rutas Cortas se generaliza a los resultados de los primeros dos intervalos y al primero para el caso de las Rutas Medianas.
- La evolución de la capacidad por ciclos de los casos mostrados, presentan curvas no lineales. La intersección con la condición de 70% de capacidad se obtiene entre los 2500 y 3000 ciclos. En particular el ejemplar de la Ruta corta presenta un valor de 2.852 y para el caso de las Rutas Medianas y Largas 2.953 y 2706, respectivamente.
- El estudio de la realización aleatoria de rutas muestra correspondencia con los resultados de la estimación de degradación por cada ruta, es decir, los valores promedios son similares.

- La tabla muestra que las rutas medianas obtienen la mayor cantidad de ciclos, seguida de las Rutas Cortas, Todas las rutas y Rutas Largas.
- Caso particular se evidencia de los resultados al considerar todas las rutas, ya que el valor promedio de la cantidad de ciclos es similar al obtenido en las rutas cortas, 2.835 y 2.848 ciclos, respectivamente.

De la figura 5.12 se desprende lo siguiente:

- Las correlaciones muestran 3 comportamientos diferentes entre los resultados de Cantidad de ciclos al 70% de capacidad y RA.
- Las Rutas Cortas describen una relación positiva, con un coeficiente de correlación de 0,5, es decir, se esperaría que un mayor grado de agresividad en la conducción cause que sean necesario una mayor cantidad de ciclos para alcanzar la capacidad objetivo o bien la degradación de la batería es menor.
- Las Rutas Medianas no muestran que las variables se encuentren relacionadas, pues el coeficiente de correlación es de 0,05.
- Las Rutas Largas manifiestan que existe una correlación negativa, con un coeficiente de 0,47 y su comportamiento es inverso al expresado en el caso de las Rutas Cortas, es decir, un mayor grado de agresividad en la conducción propiciaría una mayor degradación de la batería.

Conclusión

El detalle de cada ejes de investigación se expone a continuación:

1. Caracterización energética

- El modelo energético basado en potencias logra caracterizar las rutas estudiadas, según los resultados de errores simple (todos $<5\%$) y cuadrático medio.
- Las Rutas Cortas exhibieron el mayor rendimiento, medido en kilómetros por cada kWh de energía consumida. Le siguen Las Rutas Medianas y finalmente las Rutas Largas presentan el menor valor. Análogamente, el consumo eléctrico presenta un comportamiento contrario.
- La Regeneración en distancia se presenta como la principal causa del comportamiento antes descrito, considerando que los valores que caracterizan a los tipos de ruta siguen la tendencia del rendimiento.
- Las evoluciones temporales de variables como la energía consumida y la regeneración presentan mayores fluctuaciones en las rutas cortas, en comparación a las rutas Medianas y Largas.
- Los resultados indican que la regeneración depende del perfil de velocidad y altimetría.

2. Cuantificación de la agresividad en la conducción

- La decisión de disminuir el porcentaje de varianza en el estudio de frecuencias de corte, resultó beneficioso para la determinación de la métrica RA.
- El estudio de Caso 1 no muestra resultados concluyentes, sin embargo el estudio parcelado por tipo de rutas, tanto Caso 2 y Caso 3, exhiben coeficientes de correlación más altos en valor absoluto.
- El estudio de los casos 2 y 3 demuestra que Las Rutas Cortas se encuentran mayormente correlacionadas con los indicadores energéticos considerados.
- Para las Rutas Cortas, una mayor agresividad en la conducción propicia un mayor rendimiento o va en detrimento del consumo eléctrico.
- El caso 2, también muestra aumentos de los coeficientes de correlación para las Rutas Medianas y Largas. Sin embargo, el caso 3 no mostró aumentos importantes.

3. Degradación de la batería

- El valor promedio del número de ciclos al 70 % de capacidad, resultó estar sobre los 2500 ciclos considerados.

- El orden ascendente en la cantidad de ciclos al 70 % de capacidad es: Rutas Largas, Rutas Cortas, Rutas Medianas.
- Los resultados de la degradación presentan menor variabilidad en las Rutas Cortas.
- Un mayor grado de agresividad en la conducción propicia una menor degradación de la batería para el caso de las Rutas Cortas
- Un mayor grado de agresividad en la conducción propicia una mayor degradación de la batería para el caso de las Rutas Largas

Bibliografía

- [1] IEA: International Energy Agency Data and statistics: Explore energy data by category-indicator-country or region. [www.iea.org](http://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables). Recuperado en <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables>. .
- [2] Esther de Aragón (2019) Las ventas de vehículos eléctricos en el mundo crecieron un 64 % en 2018. movilidadelectrica.com. Recuperado en <https://movilidadelectrica.com/las-ventas-de-vehiculos-electricos-globales-2018/>. . pages 1–9.
- [3] Redacción Central (2019) Noruega ya vende más autos eléctricos que a combustión. [Rio Negro](http://www.rionegro.com.ar). Recuperado en <https://www.rionegro.com.ar/noruega-ya-vende-mas-autos-electricos-que-a-combustion-944016/>. . pages 1–9.
- [4] Agencia de Sostenibilidad Energética Electromovilidad Proyección y Propuestas para avanzar 2018. .
- [5] Jorge Beher (2019). Nissan LEAF 2019 inicia finalmente su venta en Chile . autocosmos.com. Recuperado en <https://noticias.autocosmos.cl/2019/07/22/nissan-leaf-2019-inicia-finalmente-su-venta-en-chile>. . pages 1–9.
- [6] ElectroMOV.cl (2019) Nissan Leaf supera las 400.000 unidades vendidas en el mundo. www.electromov.cl. Recuperado en <http://www.electromov.cl/2019/03/13/nissan-leaf-supera-las-400-000-unidades-vendidas-en-el-mundo/>. . pages 1–9.
- [7] Movilidad eléctrica contra el cambio climático. www.endesa.com. Recuperado en <https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/energia-y-mas/movilidad-electrica-contra-el-cambio-climatico#>. Endesa. .
- [8] Guía Chile Energía (2019). Vehículos eléctricos sobrepasarán a los convencionales hacia el año 2040. GUÍA CHILE ENERGÍA. Recuperado en <https://www.guiachileenergia.cl/vehiculos-electricos-sobrepasaran-a-los-convencionales-hacia-el-ano-2040/>. . pages 1–9.
- [9] ANAC (2019). Informe del Mercado Automotor. Recuperado en <https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2019/05/04-ANAC-Mercado-Automotor-Abril-2019.pdf>. . pages 1–9.

- [10] Integrante Mauro, Zumbado Ruiz, Instituto Tecnológico, De Costa Rica, and Resumen El. Autos eléctricos. pages 1–6, 2015.
- [11] Rick Mabry. 10990. *The American Mathematical Monthly*, 110(1):59, 2003.
- [12] Yimin Gao, Liang Chu, and Mehrdad Ehsani. Design and control principles of hybrid braking system for EV, HEV and FCV. *VPPC 2007 - Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (1):384–391, 2007.
- [13] Aramis Perez, Francisco Jaramillo, Vanessa Quintero, and Marcos Orchard. Characterizing the Degradation Process of Lithium-ion Batteries Using a Similarity-Based-Modeling Approach. *Prognosis and Health Management European conference 2018*, pages 1–9, 2018.
- [14] Fan Yang, Yuanyuan Xie, Yelin Deng, and Chris Yuan. Considering Battery Degradation in Life Cycle Greenhouse Gas Emission Analysis of Electric Vehicles. *Procedia CIRP*, 69:505–510, 2018.
- [15] Gang Ning and Branko N. Popov. Cycle Life Modeling of Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 151(10):A1584, 2004.
- [16] Gang Ning, Ralph E. White, and Branko N. Popov. A generalized cycle life model of rechargeable Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 51(10):2012–2022, 2006.
- [17] M. Bercibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van Den Bossche. Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:572–587, 2016.
- [18] Osterman M. Williard N, He W. Comparative analysis of features for determining state of health in lithiumion batteries. *Int J Progn Health Manag*, 4:1–7, 2013.
- [19] A. Pérez, V. Quintero, H. Rozas, F. Jaramillo, R. Moreno, and M. Orchard. Modelling the degradation process of lithium-ion batteries when operating at erratic state-of-charge swing ranges. *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2017*, 2017-January:860–865, 2017.
- [20] Chiara Fiori, Kyounggho Ahn, and Hesham A. Rakha. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168:257–268, 2016.
- [21] Nissan (2018). Ficha técnica LEAF. Recuperado en https://www-europe.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/es/brochures/E-Catalogo_LEAF_ES.pdf. . pages 1–9.
- [22] Chiara Fiori, Kyounggho Ahn, and Hesham A. Rakha. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168:257–268, 2016.
- [23] Michele De Gennaro, Elena Paffumi, Giorgio Martini, Urbano Manfredi, and Stefano Vianelli. Experimental Test Campaign on a Battery Electric Vehicle : Laboratory Test

Results (Part 1) Fernando Ortenzi and Antonino Genovese. pages 100–114, 2018.

- [24] Torrance K. Jaluria Y. Computational Heat Transfer. 2° ed. New York. Taylor Francis. 2003.
- [25] Hesham A Rakha, Kyoungcho Ahn, Kevin Moran, Bart Saerens, and Eric Van Den Bulck. Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model : Model development and testing. *Transportation Research Part D*, 16(7):492–503, 2011.
- [26] SAE International. 2011 Nissan Leaf vehicle overview; 2011.
- [27] Zifan Liu, Andrej Ivanco, and Zoran Filipi. *Quantification of drive cycle's rapid speed fluctuations using Fourier analysis*, volume 4. 2015.

Apéndice A

Tablas resumen Modelo de
Caracterización Energética por tipo de
ruta

| Rutas Cortas | | Distancia [km] | Velocidad Promedio [km/h] | SOC inicial | SOC final | Rendimiento [km/kWh] | Regeneración [kWh/km] | Error simple | Error cuadr. medio | Efic. Regeneración | Energía Regenerada kWh/hr |
|---------------------|-------------------------|----------------|---------------------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| N° | Ruta | | | | | | | | | | |
| 1 | ASE - Costanera | 1,0 | 16,0 | 95,5% | 95,0% | 4,4 | 0,025 | 0,1% | 1,3E-06 | 38,6% | 0,4 |
| 2 | Techo 4.1 | 2,6 | 24,6 | 88,6% | 87,5% | 5,9 | 0,082 | 0,1% | 2,2E-06 | 49,8% | 2,1 |
| 3 | Techo 6 | 3,1 | 18,6 | 81,0% | 78,5% | 3,1 | 0,030 | 0,8% | 5,0E-05 | 33,3% | 0,6 |
| 4 | Pque I.S. - Est Nac | 3,6 | 20,5 | 93,1% | 92,1% | 9,1 | 0,071 | 0,2% | 6,6E-06 | 74,7% | 1,5 |
| 5 | La Moneda - Est Mapocho | 3,6 | 11,3 | 89,3% | 88,1% | 7,7 | 0,072 | 0,2% | 4,2E-06 | 64,3% | 0,8 |
| 6 | Costanera - Pque I.S. | 4,0 | 15,2 | 94,7% | 93,9% | 12,1 | 0,049 | 0,4% | 1,9E-05 | 54,1% | 0,8 |
| 7 | Providencia 1 | 4,5 | 15,4 | 69,5% | 68,4% | 10,2 | 0,052 | 0,1% | 1,5E-06 | 34,0% | 0,7 |
| 8 | Varios 3 | 5,7 | 67,1 | 59,7% | 58,2% | 10,0 | 0,063 | 0,4% | 7,6E-06 | 76,4% | 2,2 |
| 9 | Est Nac - La Moneda | 6,5 | 20,1 | 91,6% | 89,6% | 8,1 | 0,058 | 0,7% | 4,5E-05 | 58,4% | 1,1 |
| 10 | Techo 5 | 6,6 | 21,6 | 81,5% | 80,6% | 17,7 | 0,067 | 0,4% | 1,4E-05 | 54,0% | 1,8 |
| 11 | Providencia 2 | 7,1 | 11,4 | 68,4% | 65,8% | 6,8 | 0,034 | 0,4% | 8,5E-06 | 30,2% | 0,4 |
| 12 | Techo 4.2 | 8,3 | 30,3 | 86,3% | 79,5% | 3,1 | 0,012 | 2,0% | 2,9E-04 | 48,8% | 0,4 |
| 13 | Cerrillos 1 | 8,7 | 20,5 | 39,7% | 37,6% | 10,5 | 0,050 | 1,4% | 3,5E-05 | 60,2% | 1,0 |
| 14 | Conce - Sn Pedro Paz | 8,9 | 27,0 | 70,2% | 66,7% | 6,3 | 0,038 | 0,8% | 3,4E-05 | 54,9% | 1,0 |
| Promedio | | 5,3 | 22,8 | 79,2% | 77,2% | 8,2 | 0,050 | 0,6% | 3,7E-05 | 52,3% | 1,06 |

Figura A.1: Tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de las Rutas Cortas.

| Rutas Medianas | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------|---------------------|
| N° | Ruta | Distancia [km] | Velocidad promedio [km/h] | SOC inicial | SOC final | Rendimiento [km/kWh] | Regeneración [kWh/km] | Error simple | Error cuadr. medio | Efic. Energía regenerada | Regeneración kWh/hr |
| 1 | Viña 3 | 11,5 | 25,6 | 79,1% | 76,3% | 10,3 | 0,034 | 0,5% | 3,7E-05 | 90,3% | 0,9 |
| 2 | Techo 1 | 12,5 | 19,9 | 77,2% | 73,9% | 9,8 | 0,071 | 0,5% | 1,8E-05 | 67,8% | 1,4 |
| 3 | Techo 3 | 13,7 | 19,7 | 65,0% | 58,7% | 5,6 | 0,042 | 0,7% | 3,5E-05 | 69,7% | 0,8 |
| 4 | Aeropuerto - Muni Maipú | 13,8 | 46,9 | 45,3% | 39,8% | 6,4 | 0,018 | 0,9% | 1,7E-05 | 65,0% | 0,8 |
| 5 | Muni Quil - Sn Cristóbal | 14,4 | 63,7 | 67,6% | 59,3% | 4,4 | 0,008 | 0,8% | 4,4E-05 | 84,8% | 0,5 |
| 6 | Cerrillos 2 | 15,1 | 15,6 | 76,7% | 72,6% | 9,3 | 0,058 | 0,2% | 2,2E-06 | 64,3% | 0,9 |
| 7 | Viña 2 | 15,3 | 43,4 | 81,6% | 78,4% | 11,9 | 0,057 | 0,5% | 2,9E-05 | 49,6% | 2,5 |
| 8 | Hualpén - Conce | 15,9 | 35,3 | 36,3% | 29,5% | 6,0 | 0,0315 | 0,9% | 1,5E-05 | 62,1% | 1,1 |
| 9 | Conce - Talcahuano | 16,8 | 27,9 | 53,3% | 46,4% | 6,2 | 0,0445 | 1,1% | 3,4E-05 | 60,2% | 1,2 |
| 10 | Viña 5.2 | 17,2 | 18,1 | 36,4% | 28,4% | 5,4 | 0,051 | 1,1% | 1,6E-05 | 59,8% | 0,9 |
| 11 | Chicureo - Muni Quilicura | 18,0 | 33,2 | 74,1% | 69,3% | 9,4 | 0,035 | 0,8% | 5,5E-05 | 58,2% | 1,2 |
| 12 | Cerrillos 3 | 18,7 | 18,3 | 72,5% | 63,9% | 6,6 | 0,035 | 0,1% | 1,1E-05 | 55,4% | 0,8 |
| 13 | ASE - Aeropuerto | 19,7 | 56,7 | 54,5% | 45,1% | 5,8 | 0,022 | 0,7% | 2,1E-05 | 72,1% | 1,3 |
| 14 | Campus Sur - ASE | 23,6 | 32,9 | 24,8% | 16,7% | 7,4 | 0,052 | 2,5% | 3,2E-05 | 75,3% | 1,9 |
| 15 | Muni Maipú - Campus Sur | 25,3 | 36,6 | 39,1% | 26,7% | 5,2 | 0,022 | 2,1% | 5,4E-05 | 70,2% | 0,8 |
| 16 | Varios 1 | 25,9 | 34,2 | 85,7% | 77,6% | 8,0 | 0,056 | 0,1% | 1,2E-04 | 77,9% | 2,2 |
| 17 | Viña 4 | 26,0 | 31,8 | 75,0% | 59,6% | 4,3 | 0,036 | 1,0% | 7,5E-05 | 59,0% | 1,1 |
| 18 | ASE - Chicureo | 26,3 | 45,6 | 85,3% | 75,3% | 6,4 | 0,028 | 0,5% | 3,5E-05 | 69,4% | 1,4 |
| Promedio | | 18,3 | 33,6 | 62,7% | 55,4% | 7,1 | 0,039 | 0,8% | 3,6E-05 | 67,3% | 1,2 |

Figura A.2: Tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de las Rutas Medianas.

| Rutas Largas | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|----------------|---------------------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------|---------------------|--|--|
| N° | Ruta | Distancia [km] | Velocidad promedio [km/h] | SOC inicial | SOC final | Rendimiento [km/kWh] | Regeneración [kWh/km] | Error simple | Error cuadr. medio | Efic. Energía regenerada | Regeneración kWh/hr | | |
| 1 | Varios 2 | 33,8 | 48,4 | 76,0% | 56,4% | 4,4 | 0,025 | 4,4% | 8,9E-04 | 67,5% | 1,2 | | |
| 2 | Talca 3.2 | 34,7 | 70,8 | 71,6% | 56,4% | 5,8 | 0,010 | 3,2% | 4,3E-04 | 79,3% | 0,7 | | |
| 3 | Farellones 1 | 38,1 | 45,2 | 89,6% | 55,5% | 2,8 | 0,008 | 5,0% | 1,6E-03 | 65,2% | 0,4 | | |
| 4 | Melipilla 2 | 39,4 | 78,8 | 62,6% | 36,2% | 3,8 | 0,006 | 4,9% | 1,0E-03 | 53,6% | 0,4 | | |
| 5 | Chillán-Concepción | 51,5 | 68,7 | 95,1% | 68,0% | 4,2 | 0,006 | 5,0% | 2,0E-03 | 66,7% | 0,6 | | |
| 6 | Sn Pedro Paz - Chillán | 57,4 | 80,6 | 66,8% | 36,5% | 4,8 | 0,020 | 4,9% | 9,7E-04 | 67,7% | 1,3 | | |
| 7 | Talca 3.1 | 62,9 | 91,0 | 95,3% | 67,6% | 5,8 | 0,006 | 2,7% | 6,3E-04 | 77,3% | 0,6 | | |
| 8 | ASE-Mostazal | 69,4 | 51,2 | 96,8% | 65,8% | 5,7 | 0,022 | 0,5% | 2,4E-05 | 58,6% | 1,2 | | |
| 9 | Talca 1 | 75,5 | 61,4 | 92,6% | 62,6% | 6,4 | 0,017 | 0,6% | 4,9E-05 | 68,8% | 1,1 | | |
| 10 | Chillán - San Javier | 81,6 | 95,2 | 96,6% | 55,8% | 5,1 | 0,005 | 5,0% | 1,7E-03 | 78,3% | 0,5 | | |
| 11 | Melipilla 1 | 83,9 | 62,7 | 96,6% | 60,8% | 5,9 | 0,023 | 1,6% | 1,8E-04 | 73,1% | 1,5 | | |
| 12 | Talca 2 | 84,2 | 88,3 | 95,8% | 61,9% | 6,3 | 0,005 | 1,4% | 3,0E-04 | 83,6% | 0,5 | | |
| 13 | Mostazal-Chimbarongo | 84,4 | 90,4 | 76,6% | 38,8% | 5,7 | 0,010 | 4,9% | 7,6E-04 | 85,6% | 0,9 | | |
| 14 | Chimbarongo-Maule | 107,0 | 81,6 | 95,5% | 42,1% | 5,1 | 0,009 | 1,0% | 6,2E-05 | 69,2% | 0,7 | | |
| 15 | Maule-Chillán | 117,9 | 93,0 | 95,2% | 41,7% | 5,6 | 0,003 | 5,0% | 9,4E-04 | 86,1% | 0,3 | | |
| Promedio | | 68,1 | 73,8 | 86,8% | 53,7% | 5,1 | 0,012 | 3,3% | 7,7E-04 | 72,0% | 0,8 | | |

Figura A.3: Tabla resumen de las principales características e indicadores energéticos de las Rutas Largas.

Apéndice B

Gráficas Modelo de Caracterización Energética de todas las rutas estudiadas

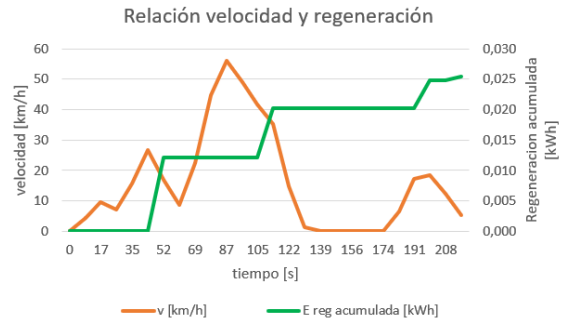
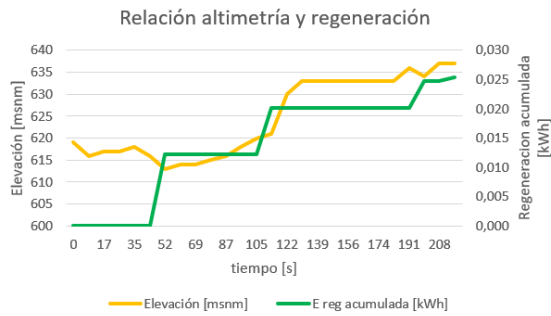
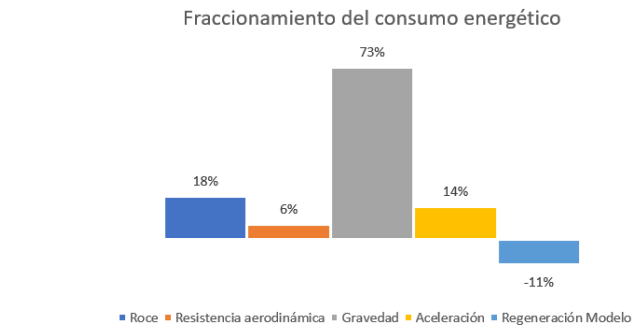
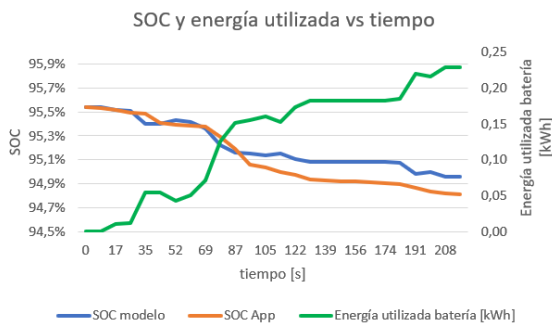


Figura B.1: Gráficos caracterización energética para ruta corta C1

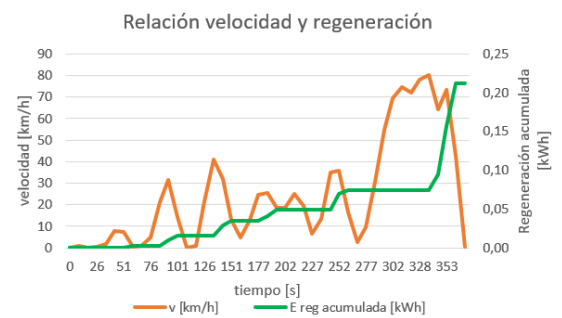
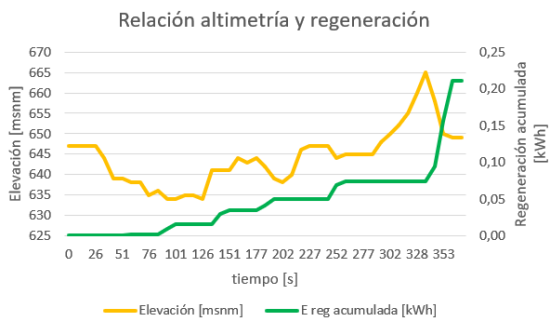
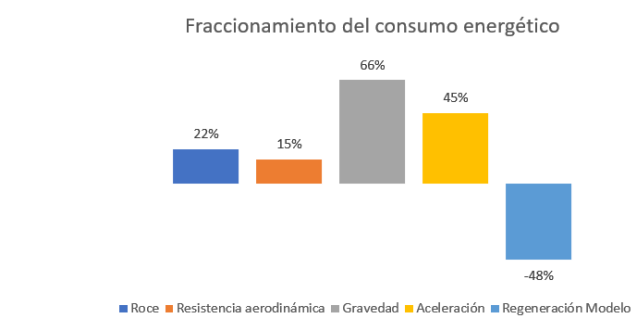
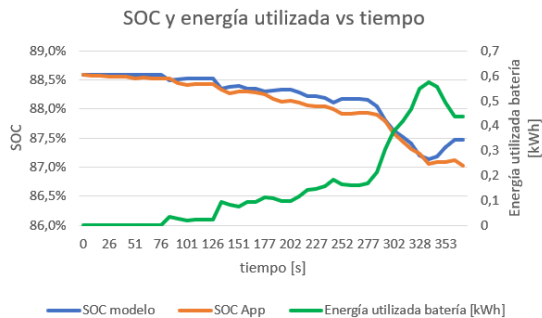


Figura B.2: Gráficos caracterización energética para ruta corta C2

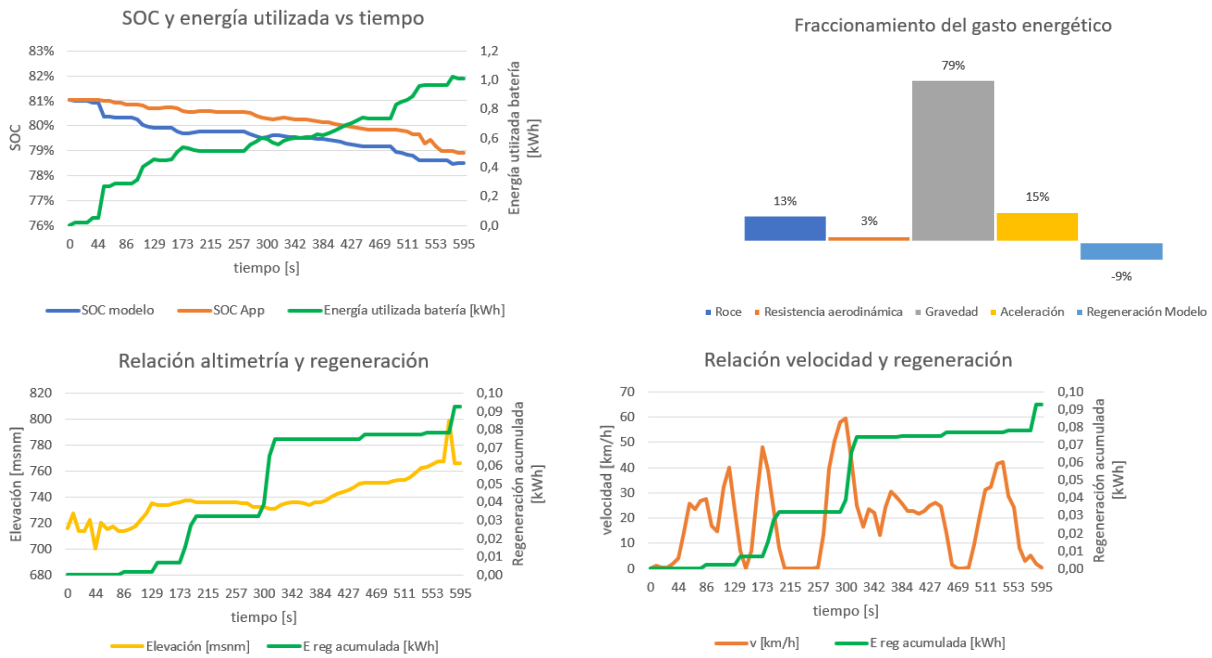


Figura B.3: Gráficos caracterización energética para ruta corta C3

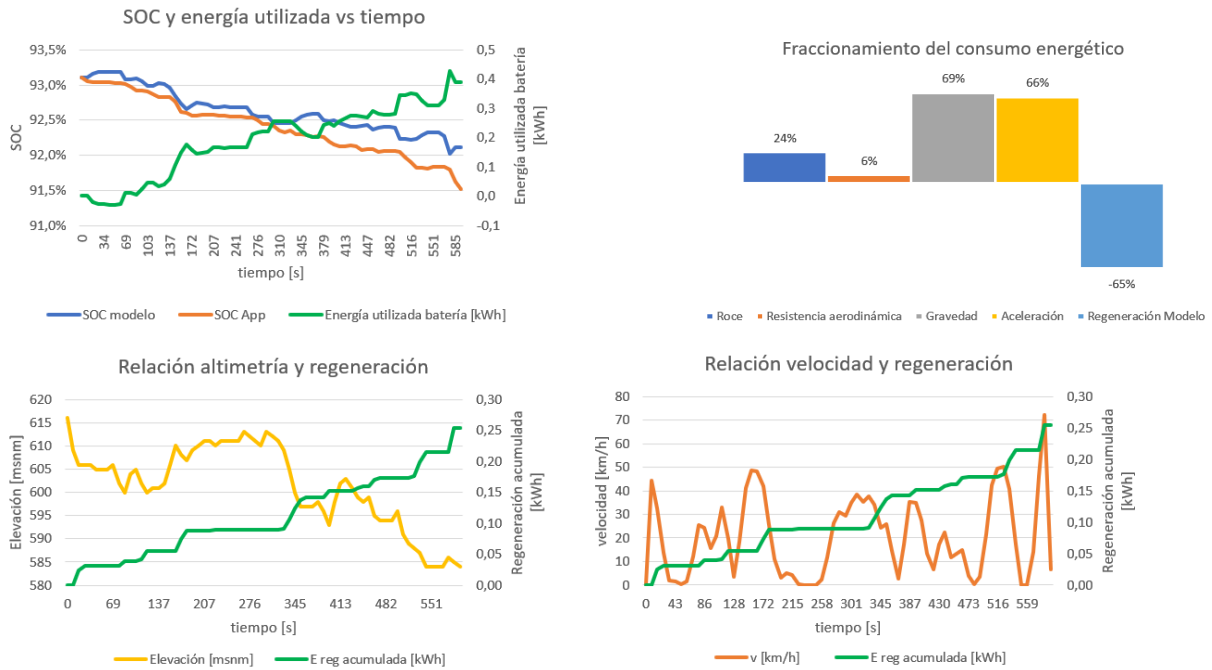


Figura B.4: Gráficos caracterización energética para ruta corta C4

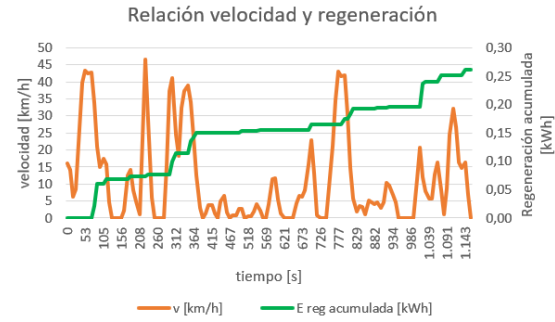
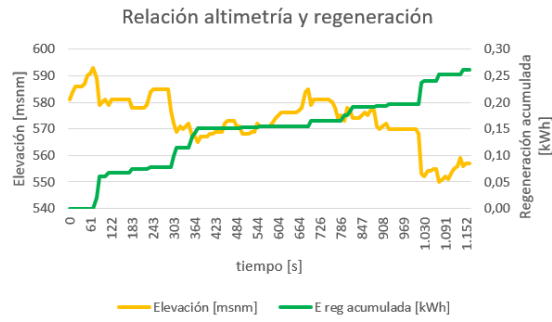
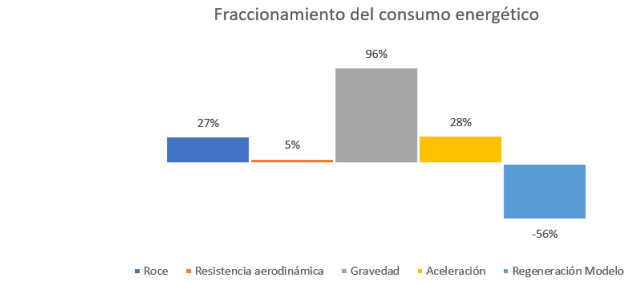
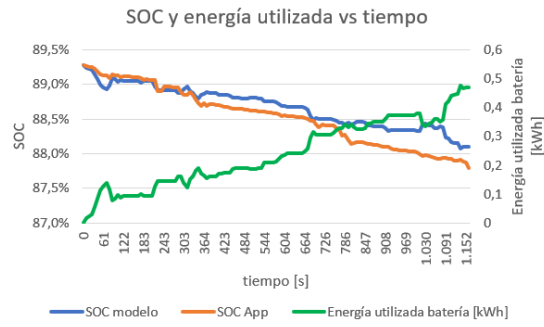


Figura B.5: Gráficos caracterización energética para ruta corta C5

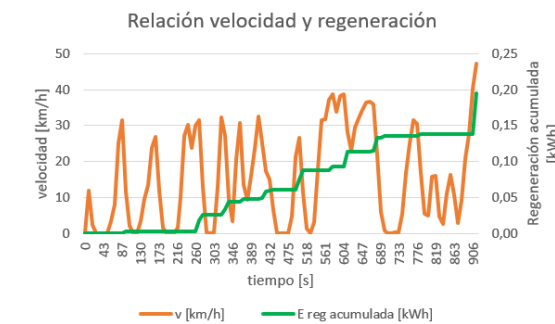
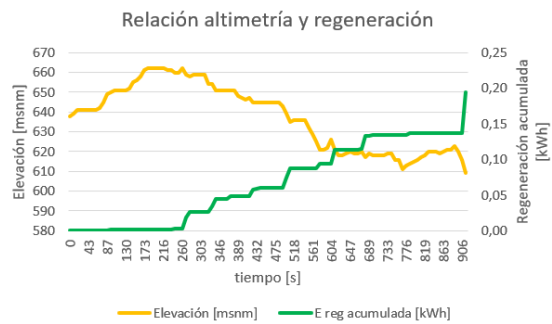
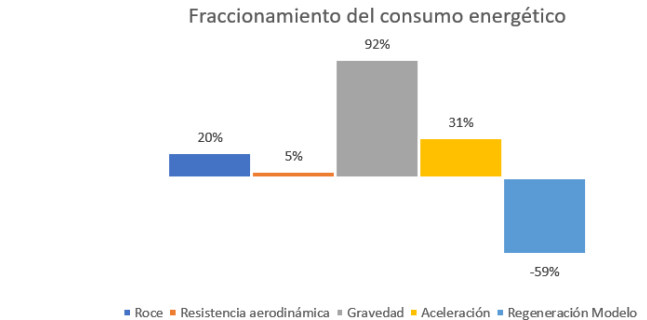
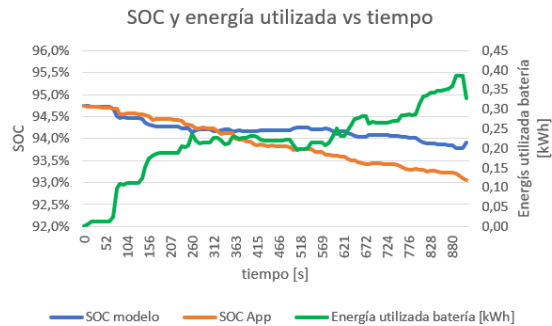
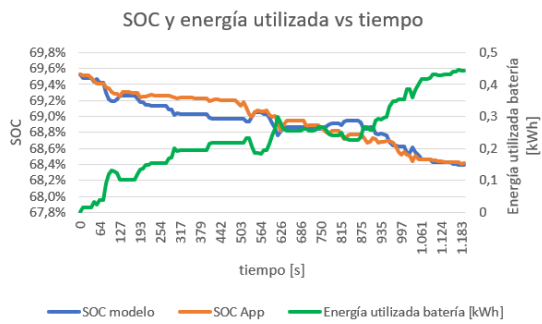


Figura B.6: Gráficos caracterización energética para ruta corta C6



Fraccionamiento del consumo energético

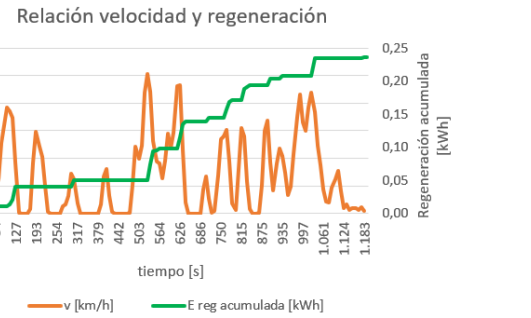
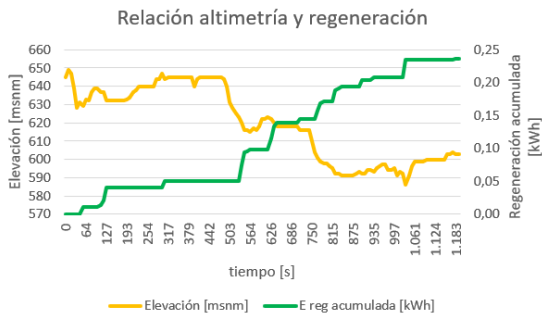
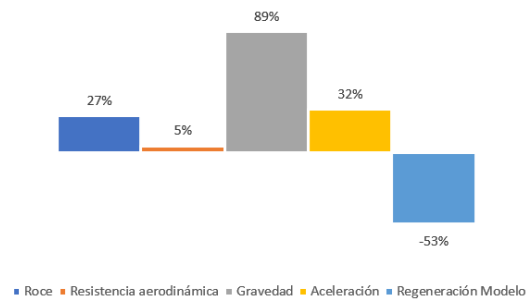
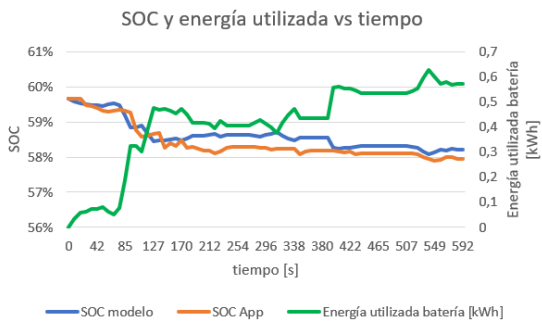


Figura B.7: Gráficos caracterización energética para ruta corta C7



Fraccionamiento del consumo energético

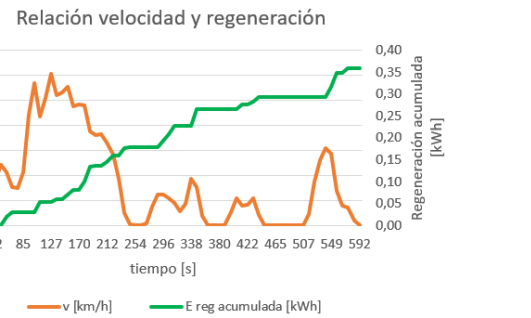
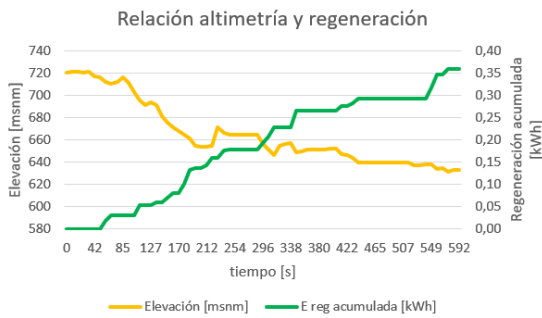
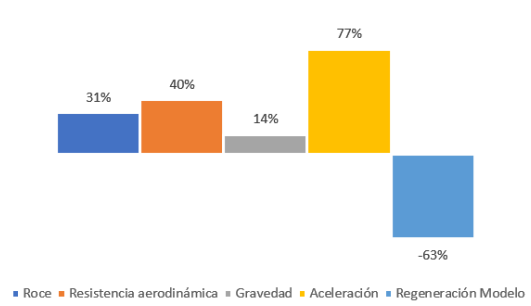


Figura B.8: Gráficos caracterización energética para ruta corta C8

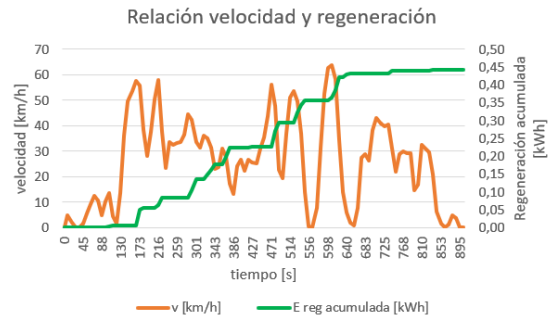
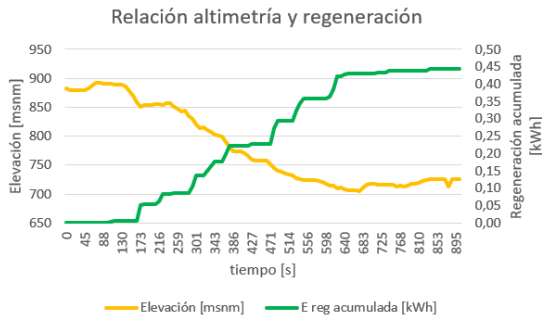
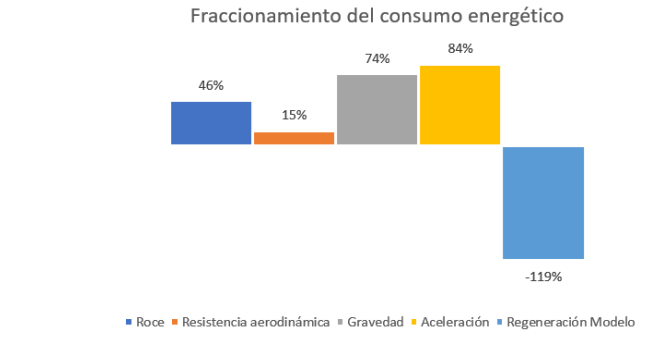
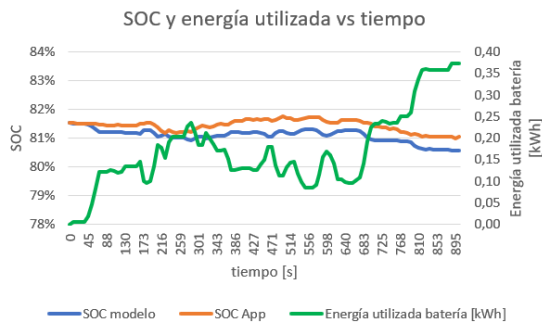


Figura B.9: Gráficos caracterización energética para ruta corta C10

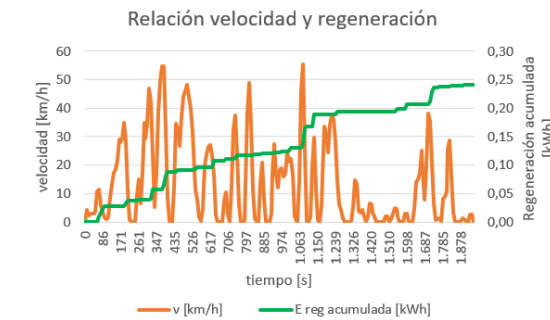
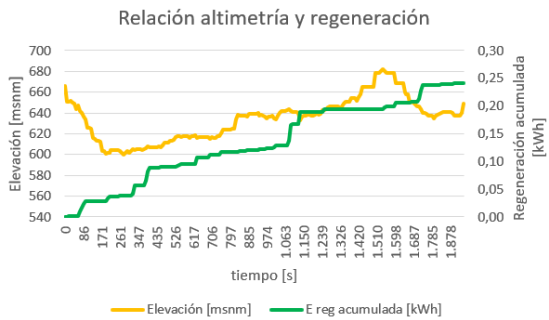
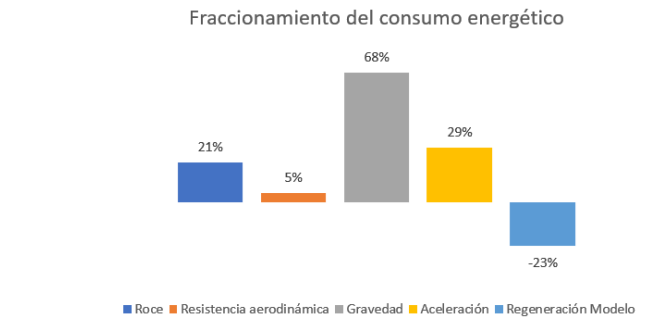
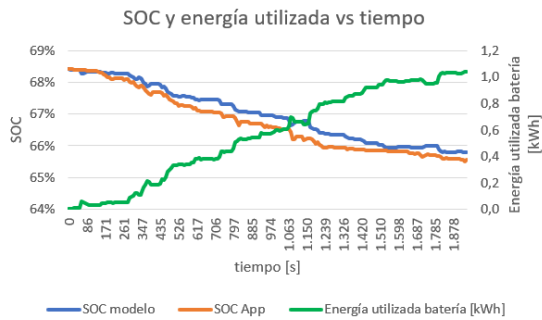
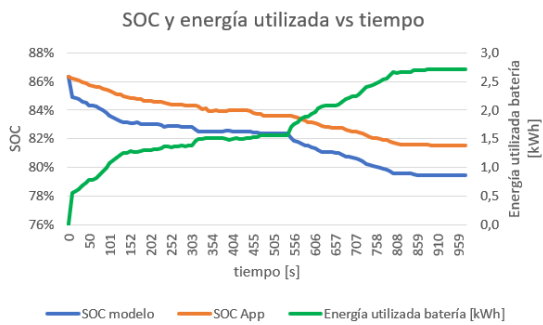
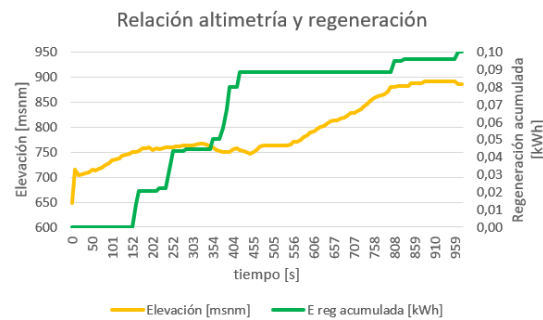
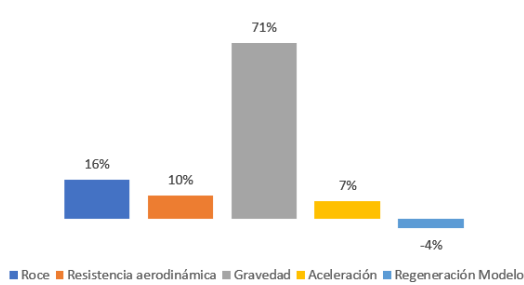


Figura B.10: Gráficos caracterización energética para ruta corta C11



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

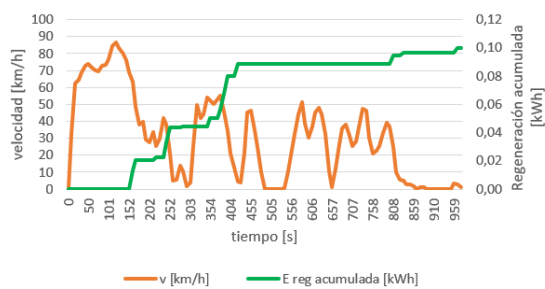
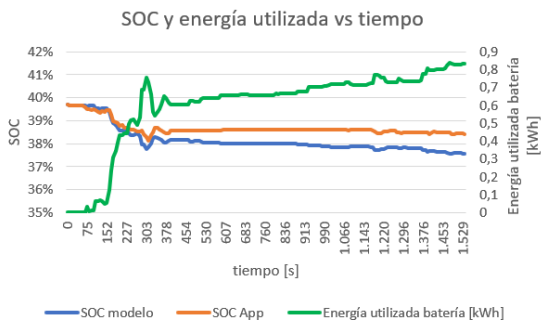
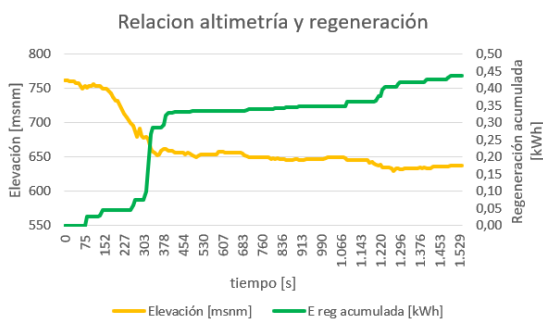
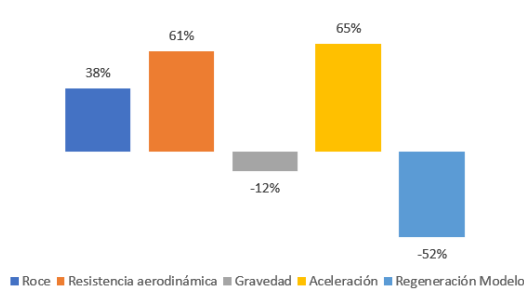


Figura B.11: Gráficos caracterización energética para ruta corta C12



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

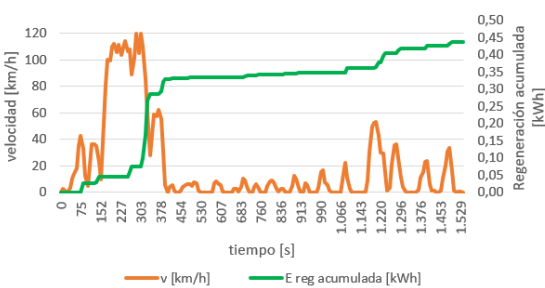


Figura B.12: Gráficos caracterización energética para ruta corta C13

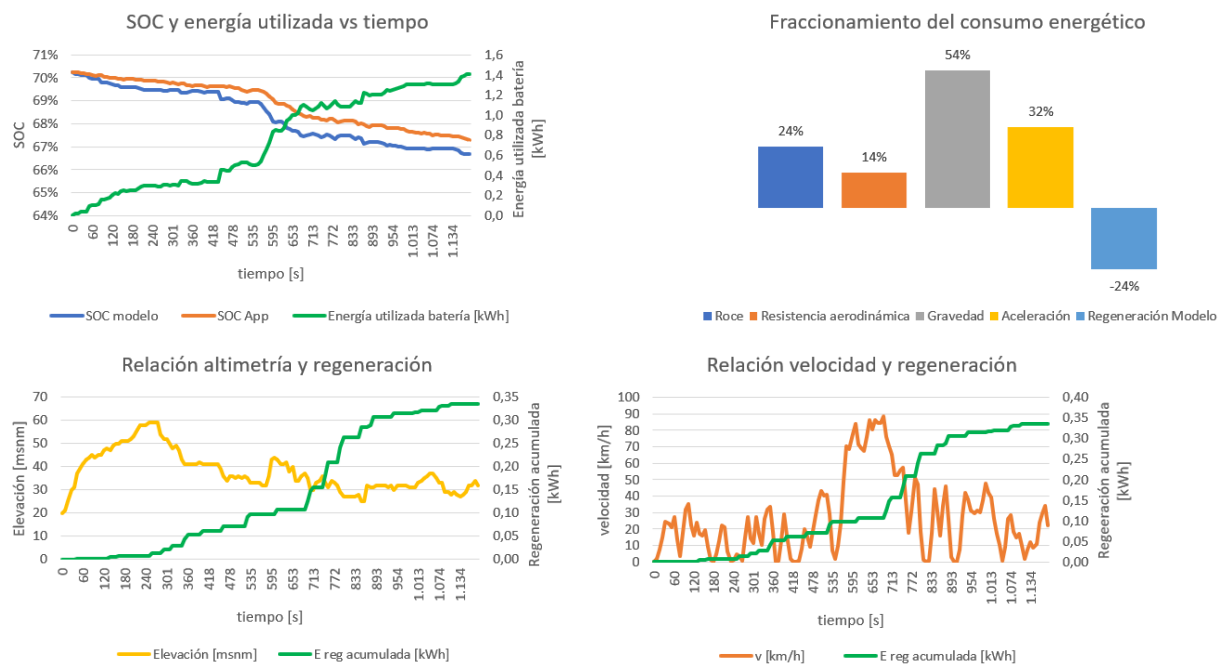


Figura B.13: Gráficos caracterización energética para ruta corta C14

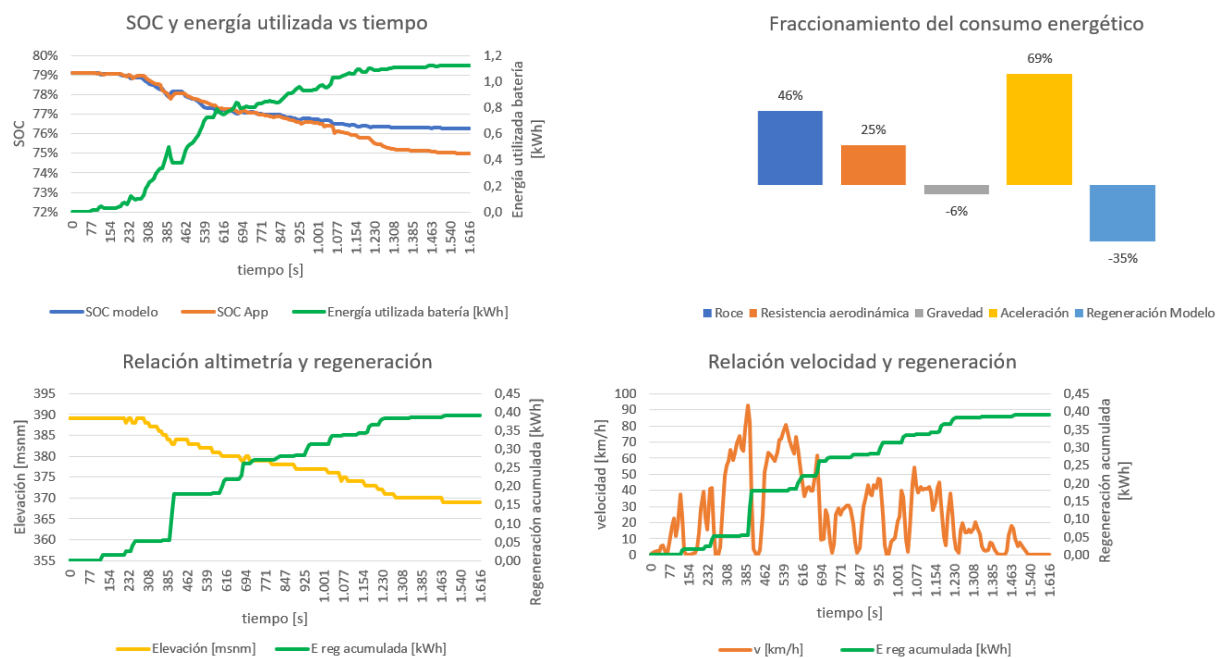


Figura B.14: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M1

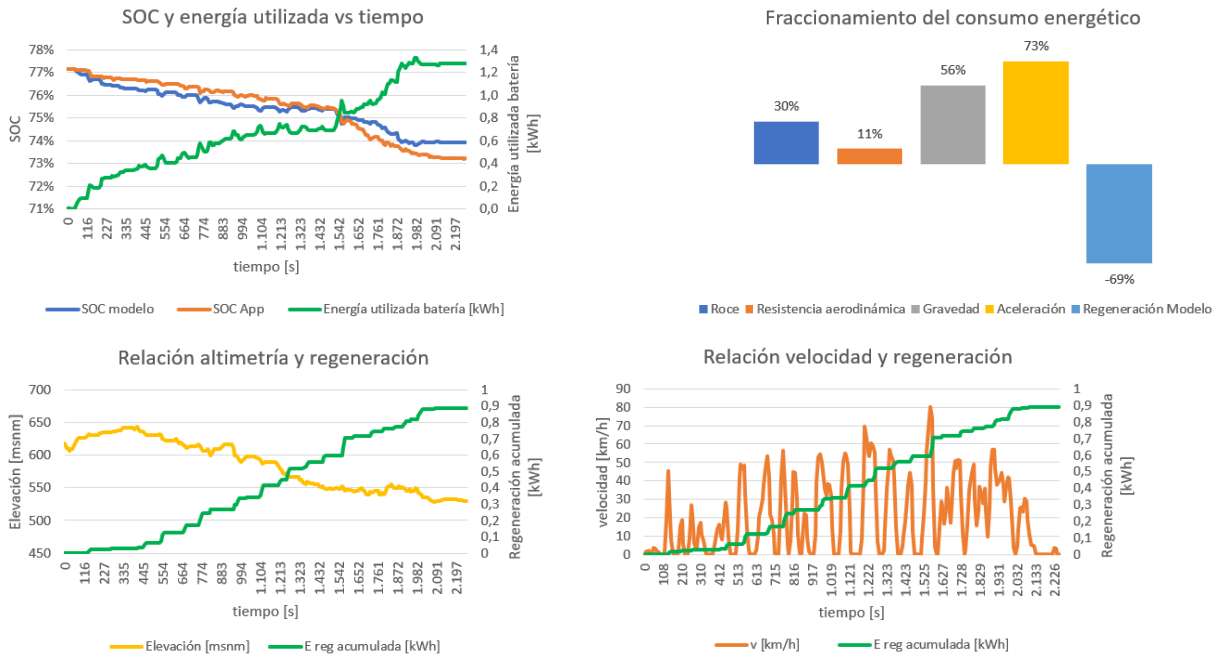


Figura B.15: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M2

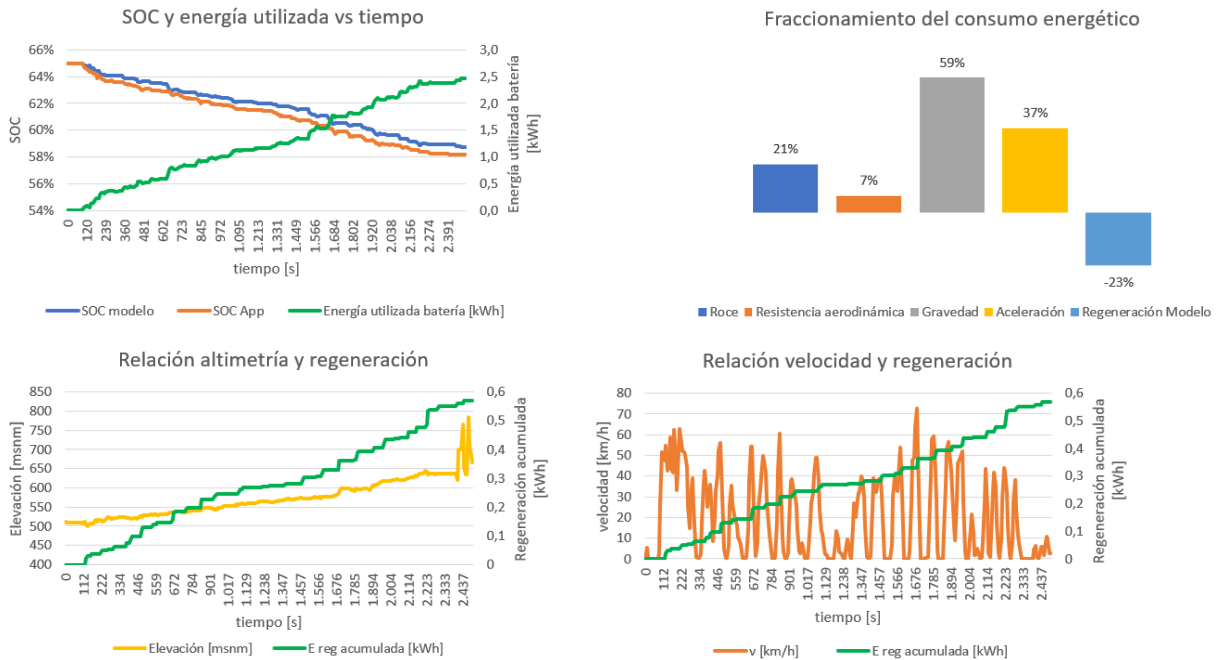


Figura B.16: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M3

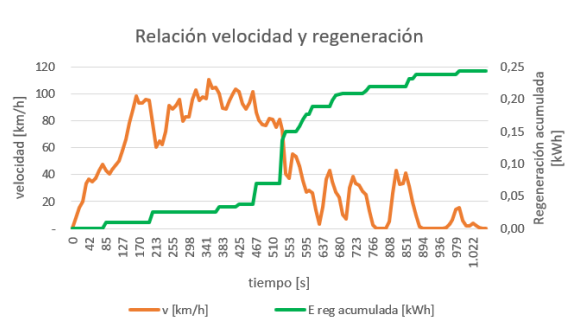
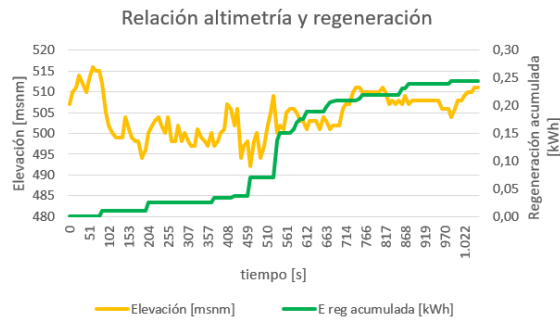
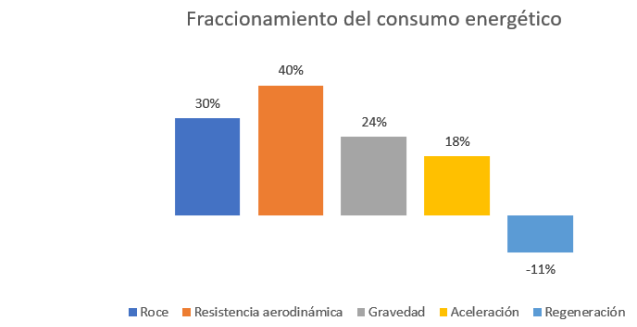
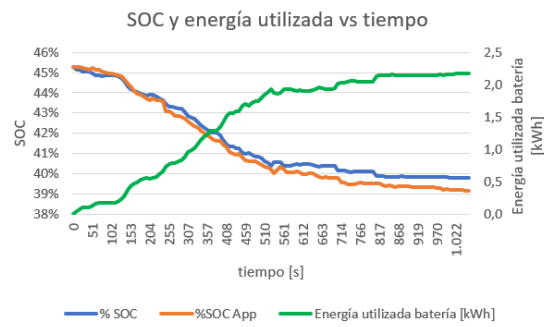


Figura B.17: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M4

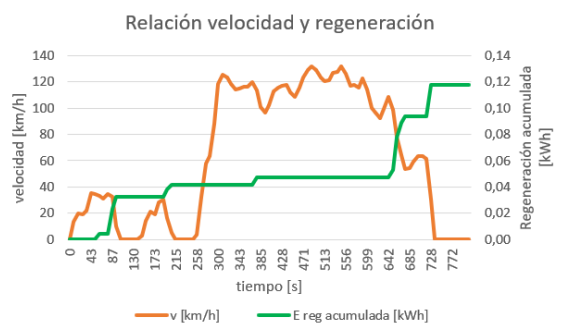
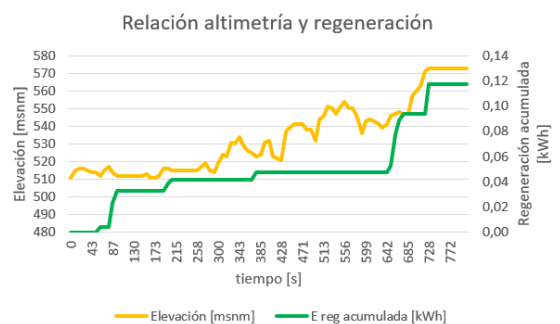
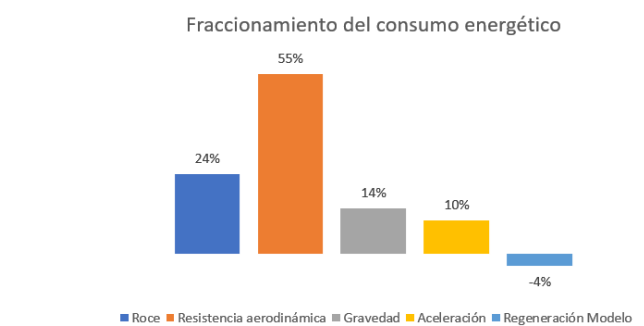
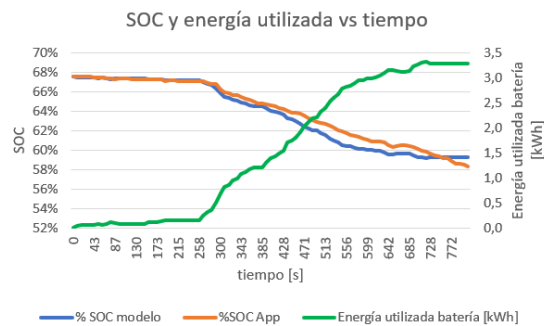


Figura B.18: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M5

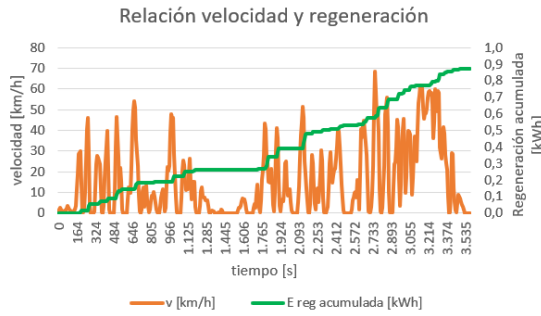
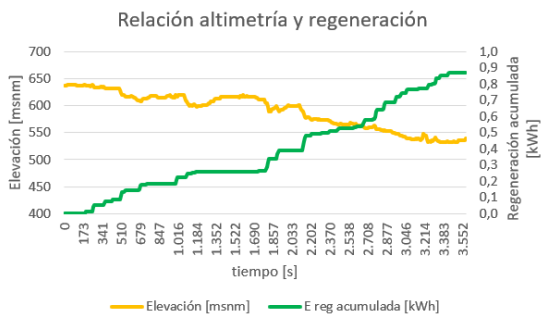
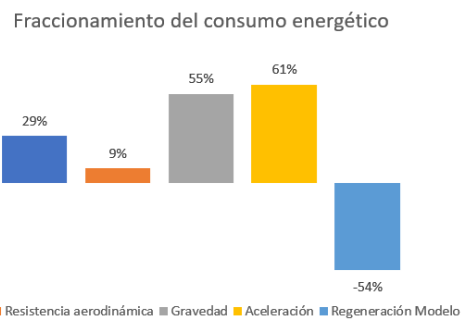
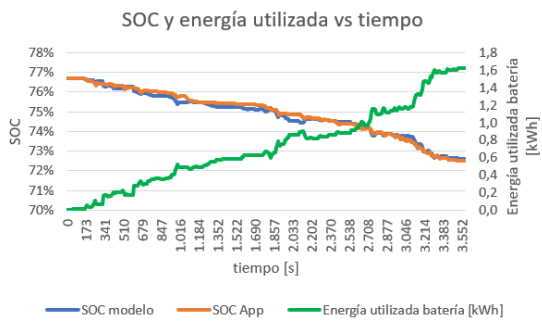


Figura B.19: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M6

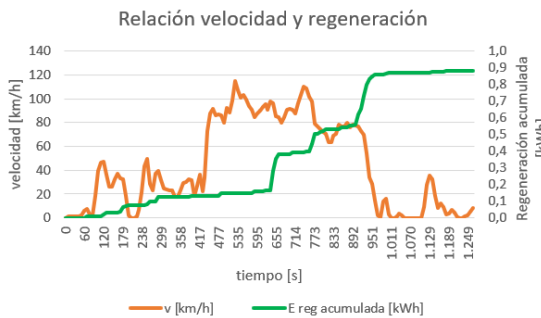
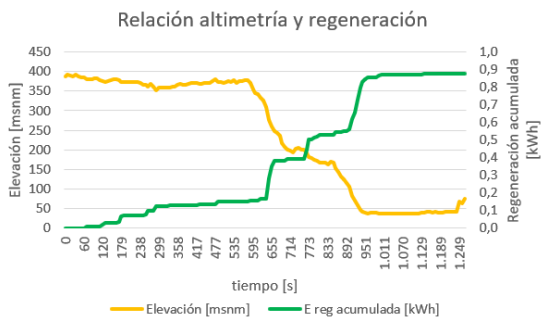
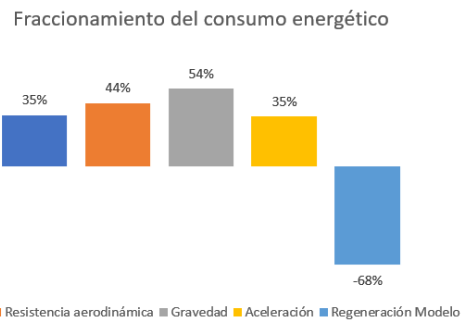
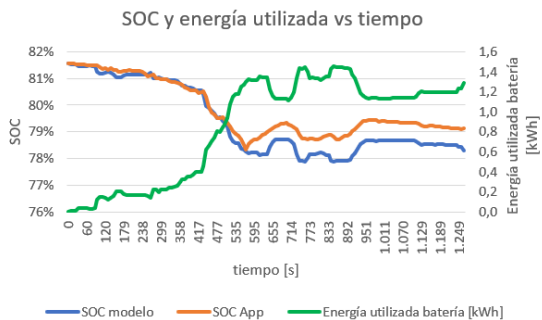


Figura B.20: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M7

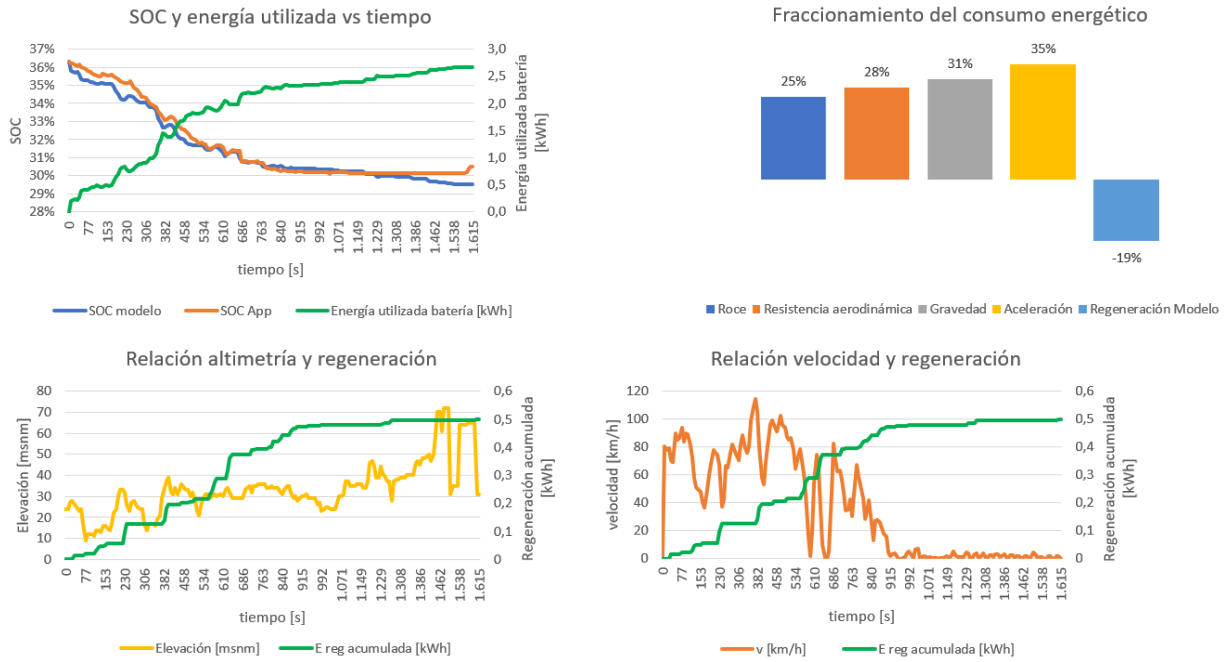


Figura B.21: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M8

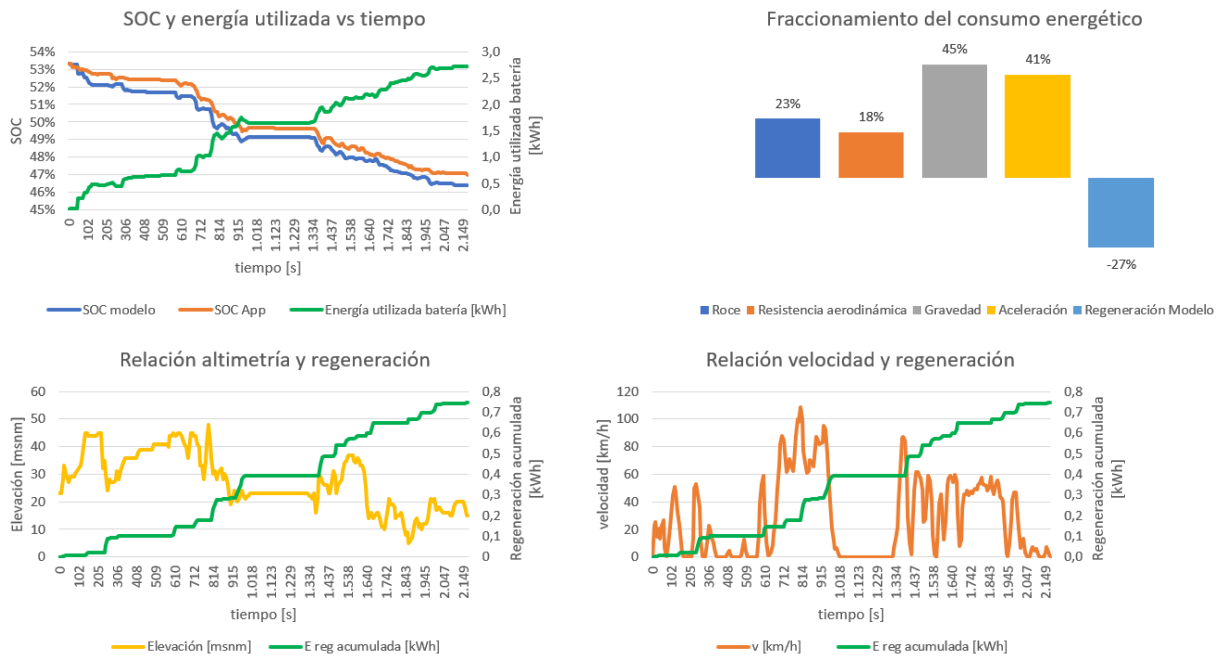
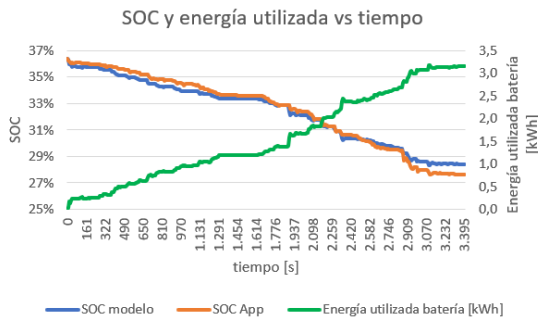
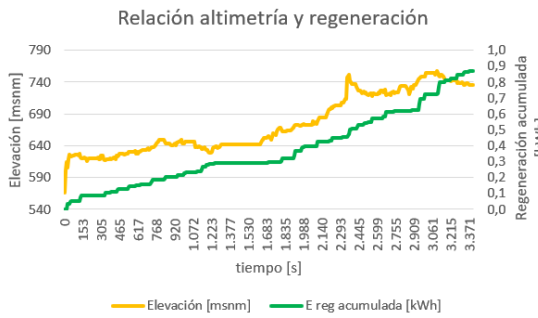
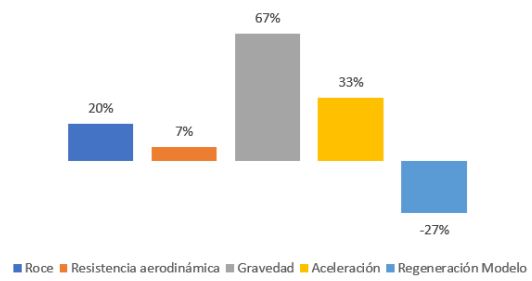


Figura B.22: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M9



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

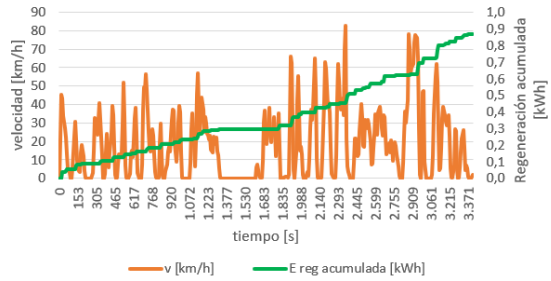
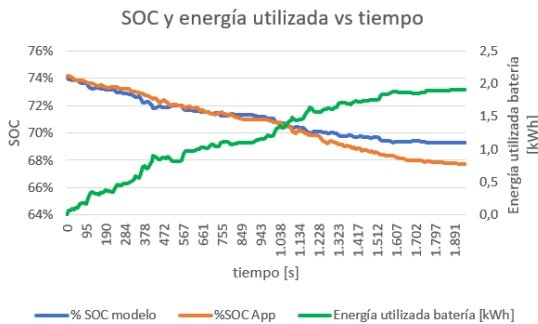
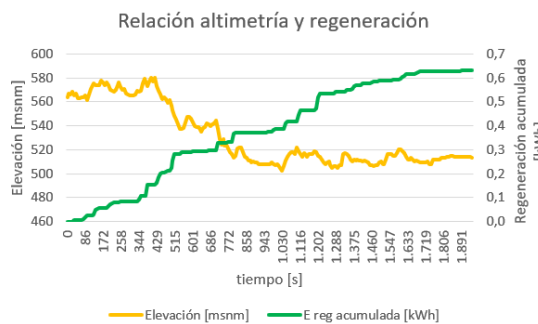
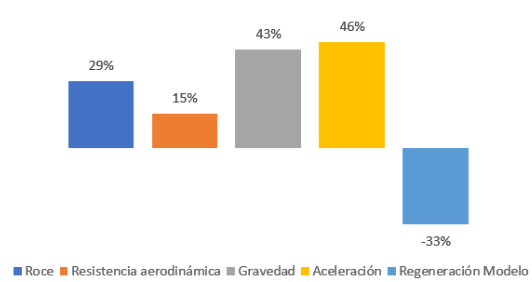


Figura B.23: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M10



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

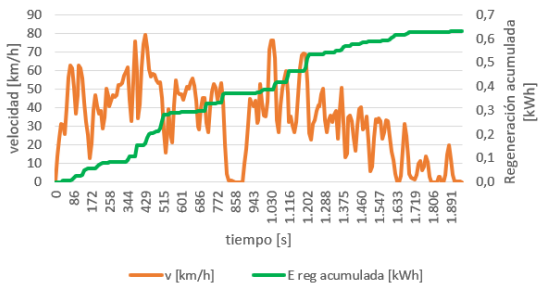


Figura B.24: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M11

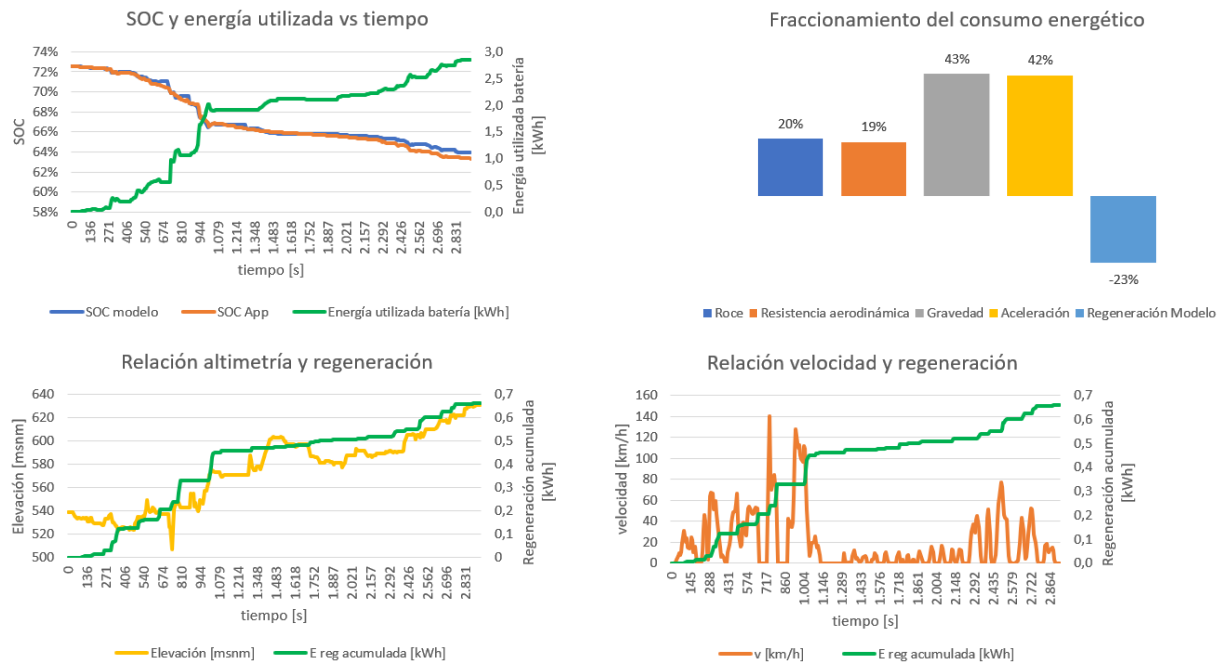


Figura B.25: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M12

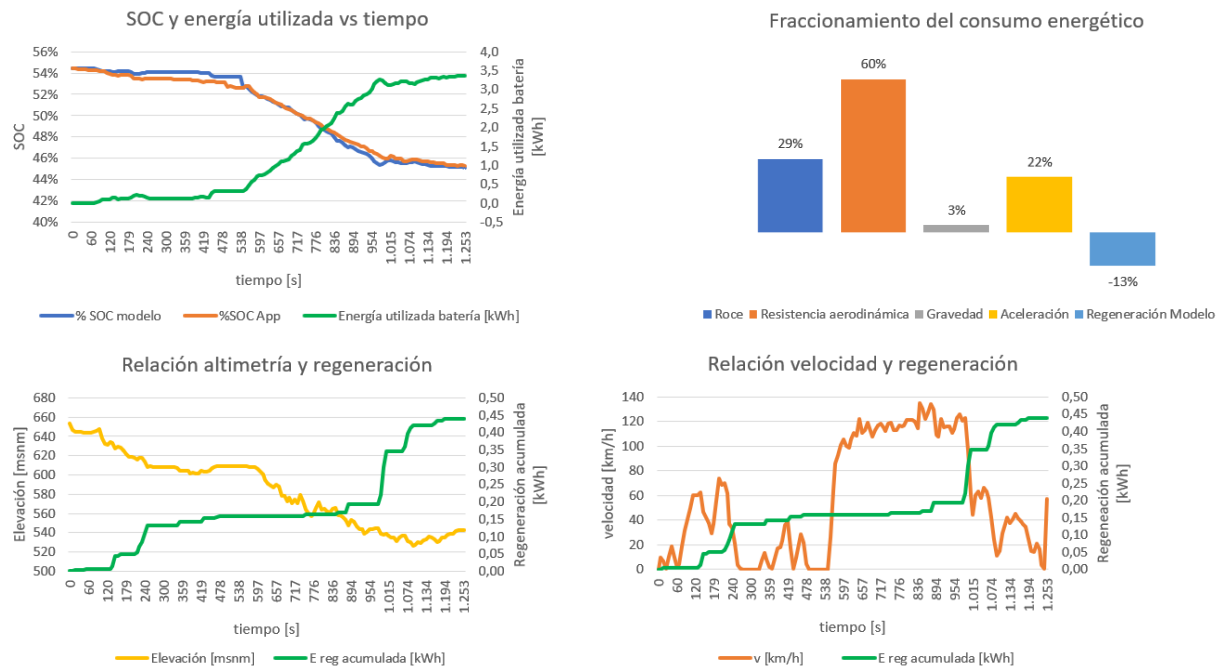
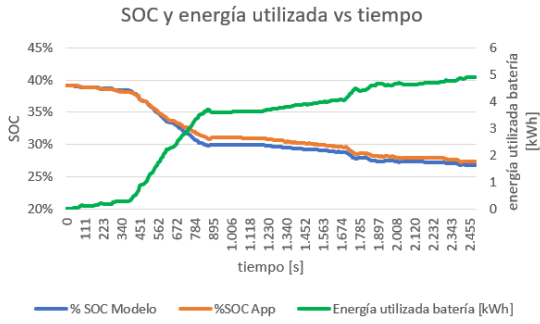
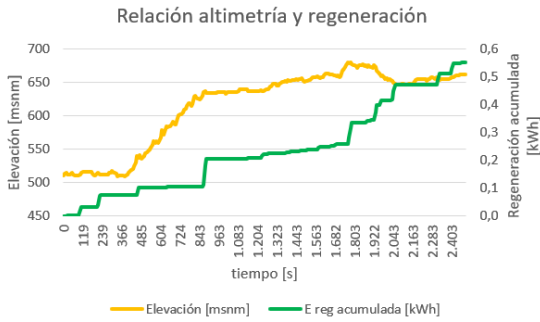
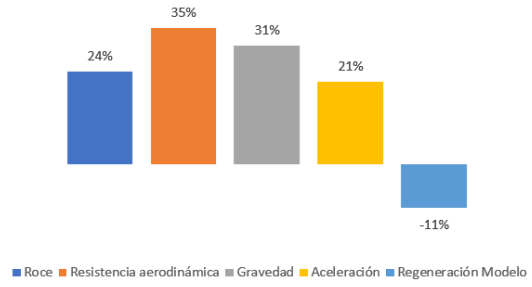


Figura B.26: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M13



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

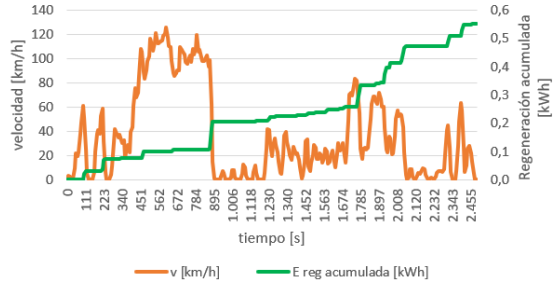
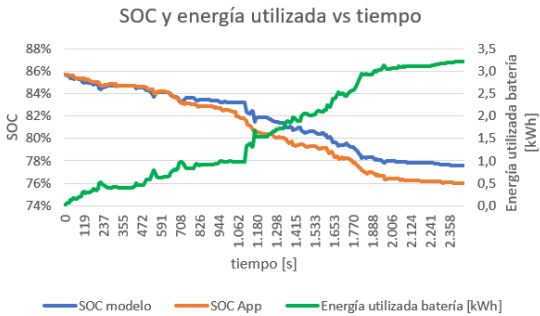
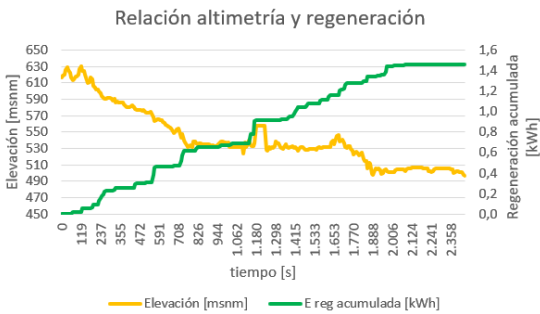
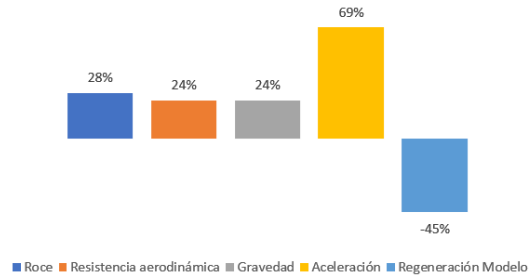


Figura B.27: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M15



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

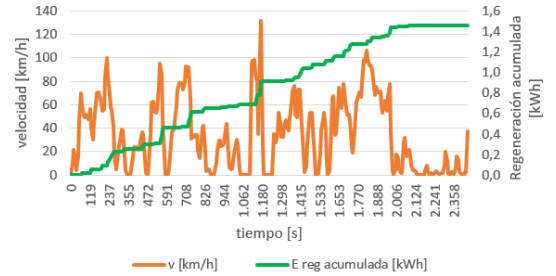


Figura B.28: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M16

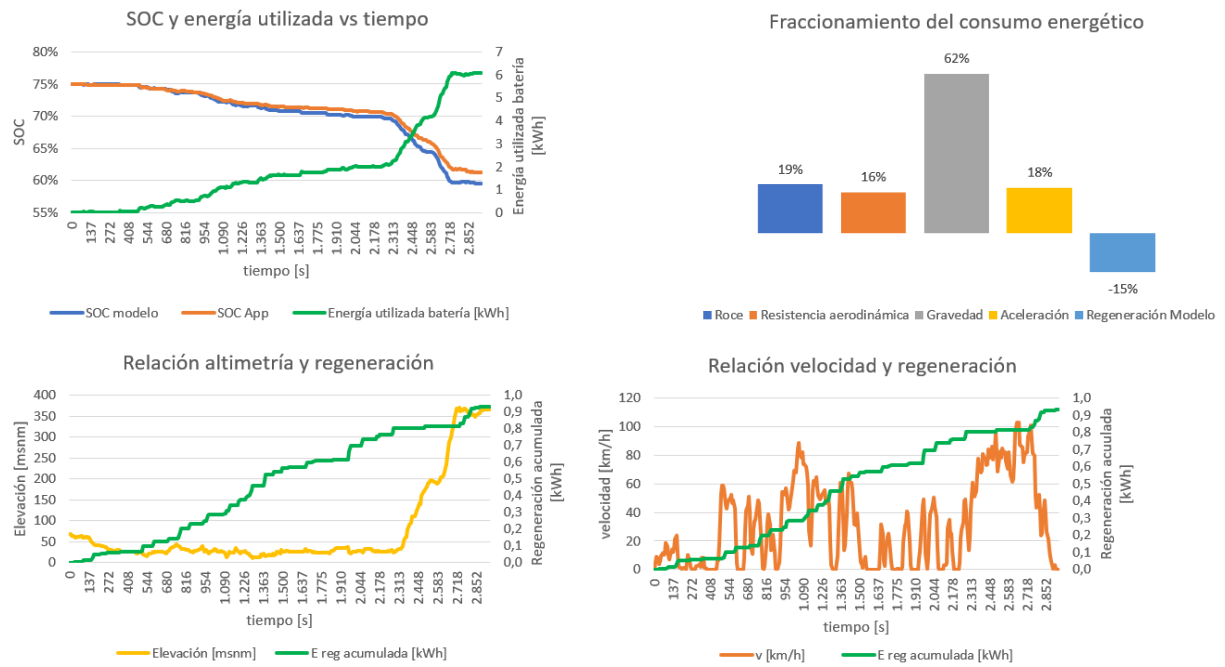


Figura B.29: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M17

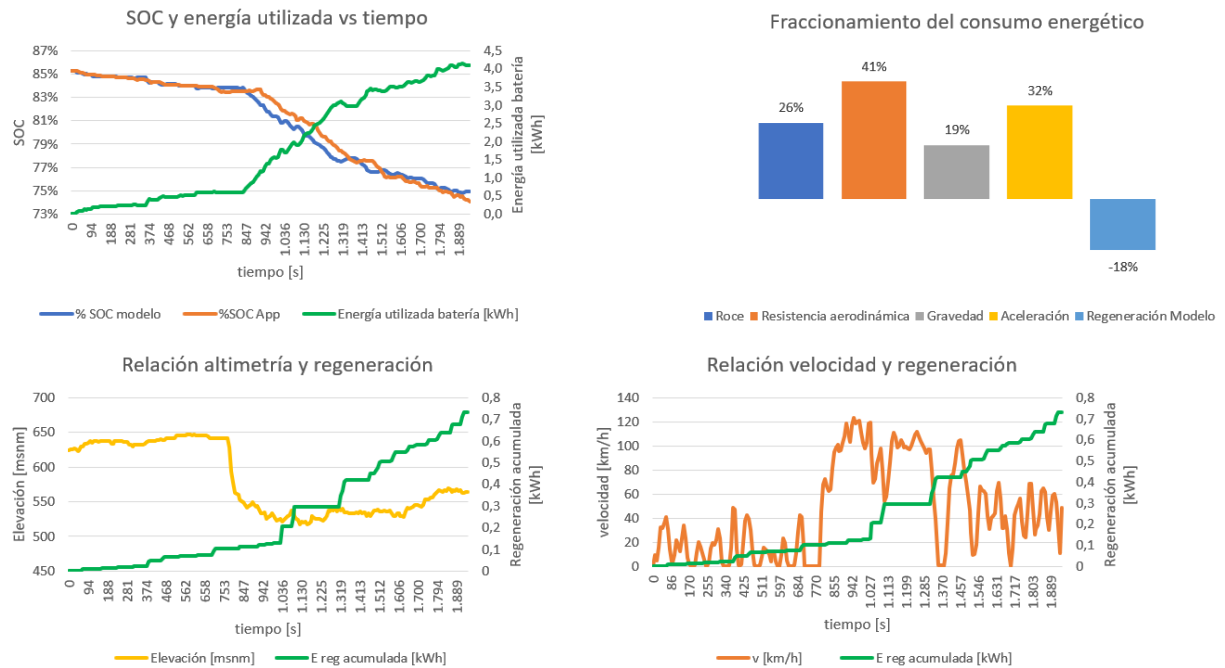
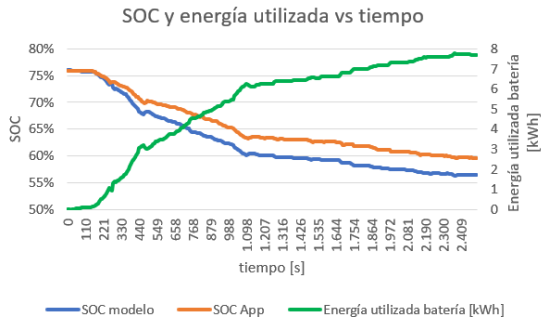


Figura B.30: Gráficos caracterización energética para ruta mediana M18



Fraccionamiento del consumo energético

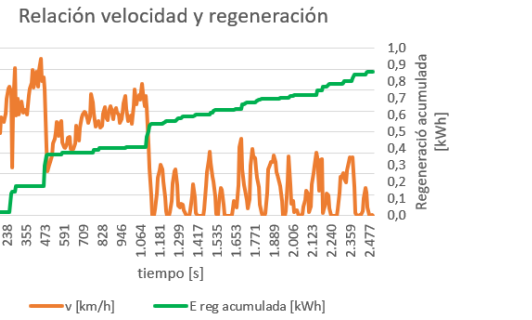
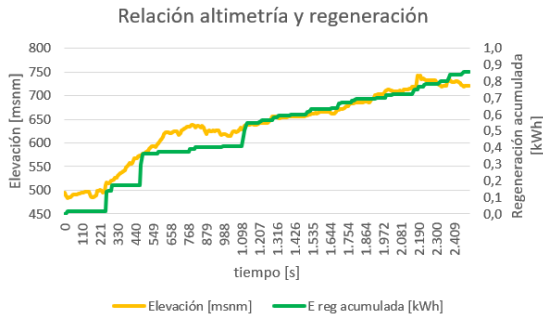
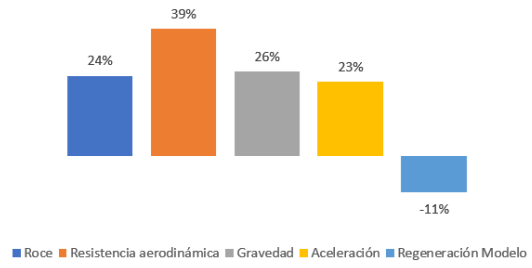
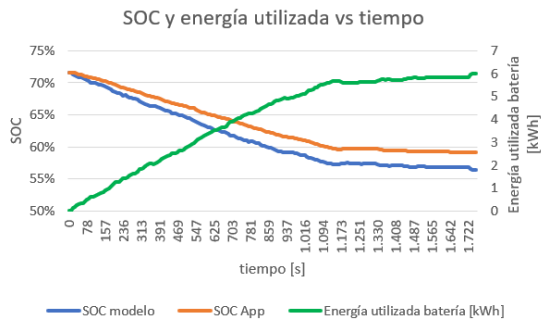


Figura B.31: Gráficos caracterización energética para ruta larga L1



Fraccionamiento del consumo energético

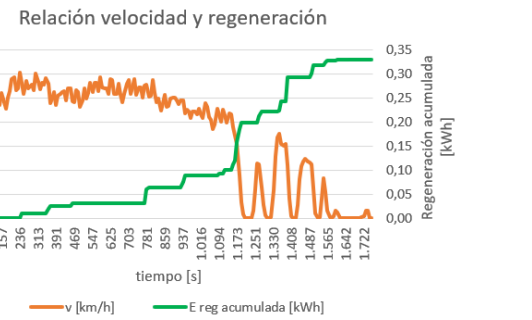
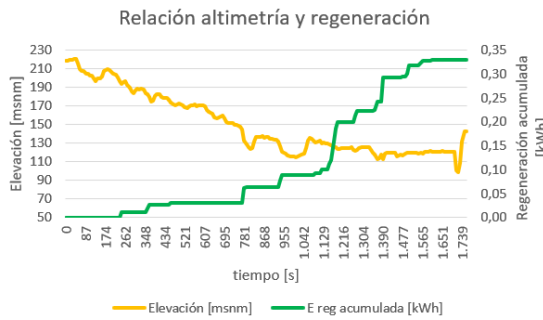
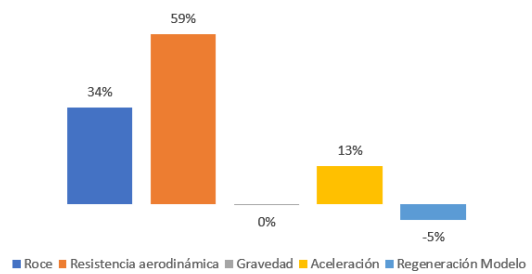


Figura B.32: Gráficos caracterización energética para ruta larga L2

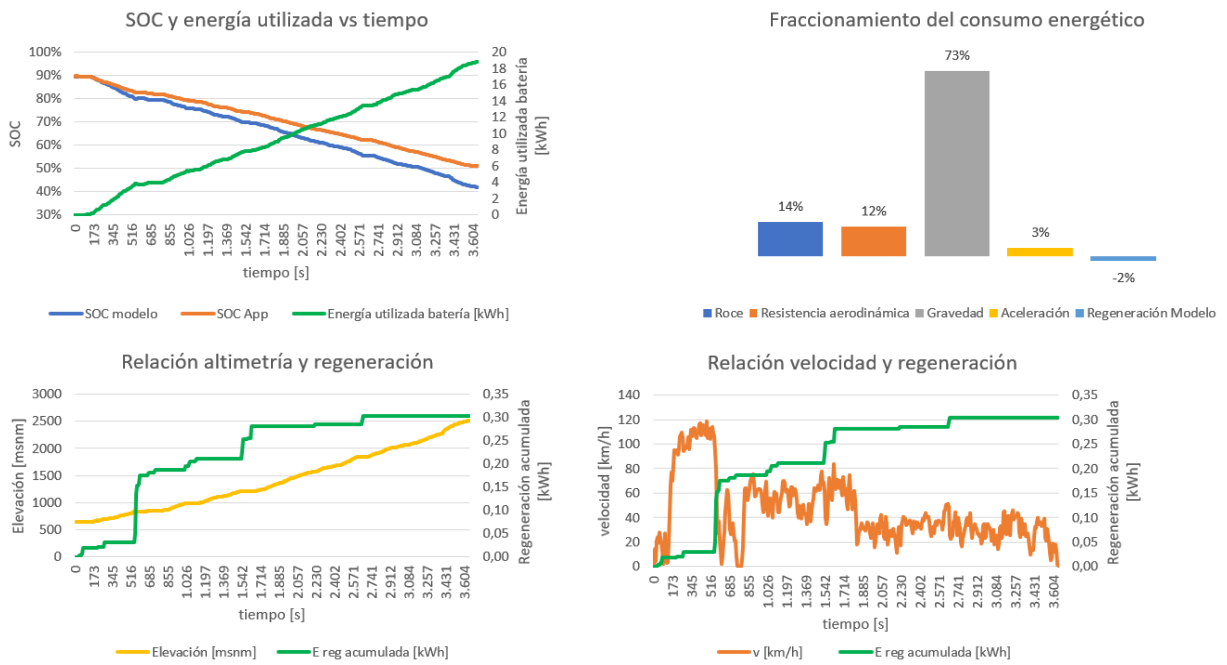


Figura B.33: Gráficos caracterización energética para ruta larga L3

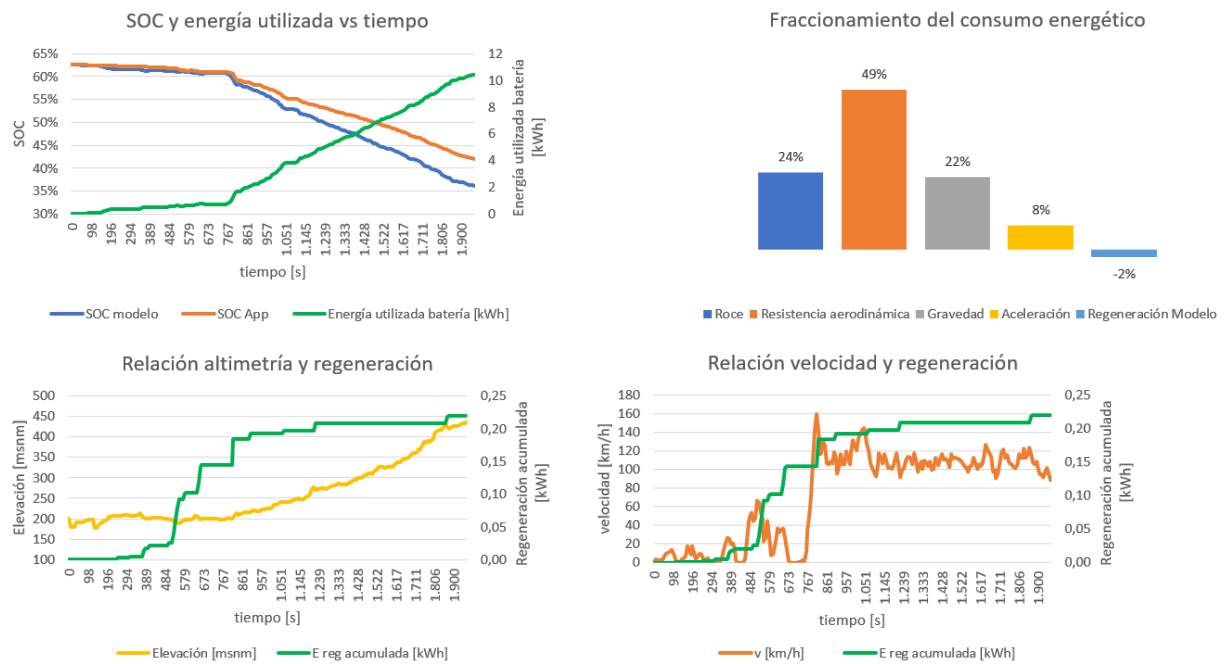
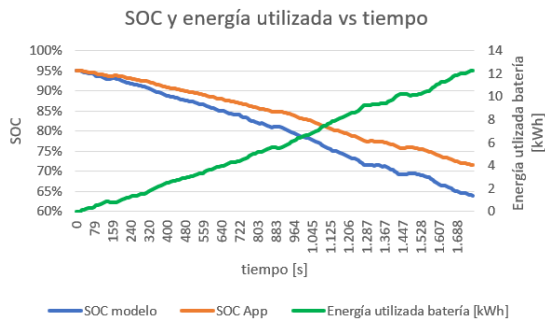
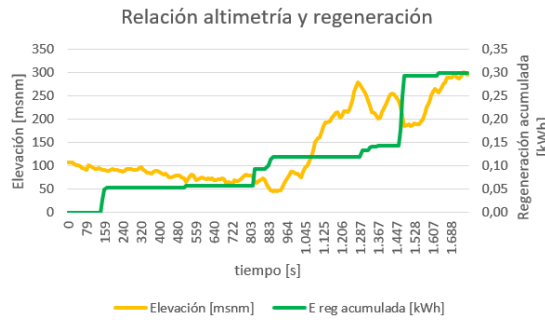
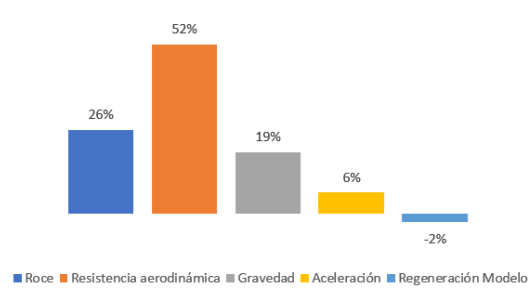


Figura B.34: Gráficos caracterización energética para ruta larga L4



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

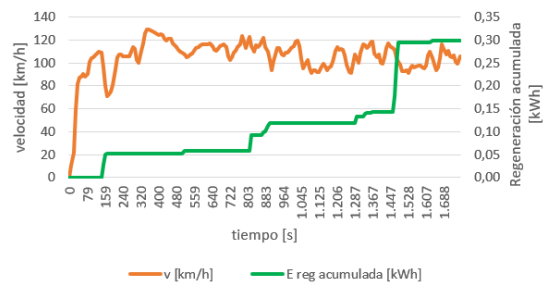
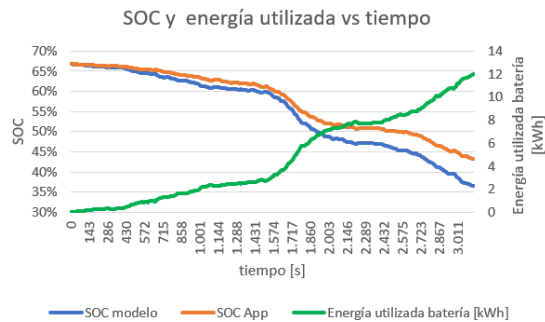
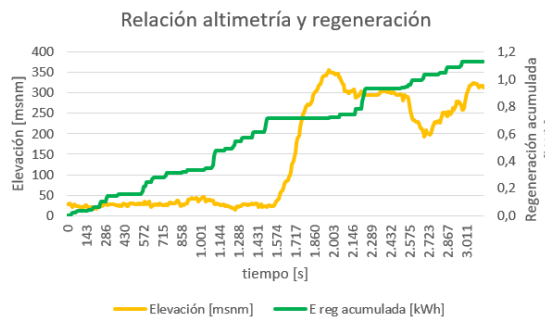
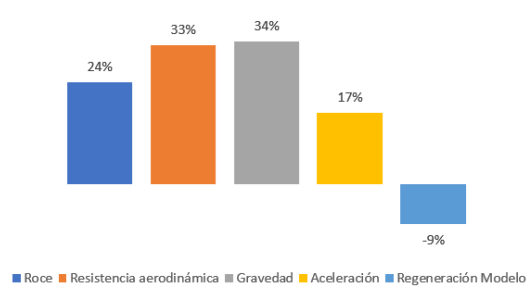


Figura B.35: Gráficos caracterización energética para ruta larga L5



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

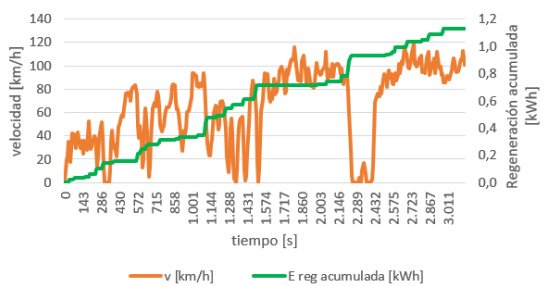


Figura B.36: Gráficos caracterización energética para ruta larga L6

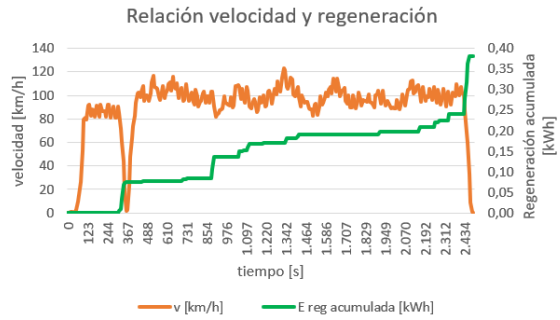
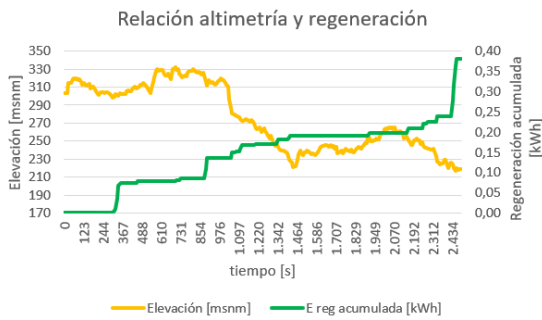
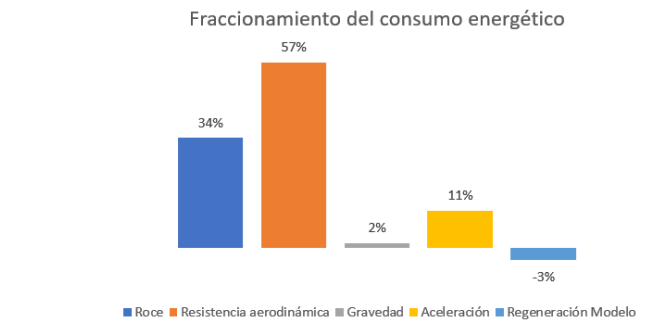
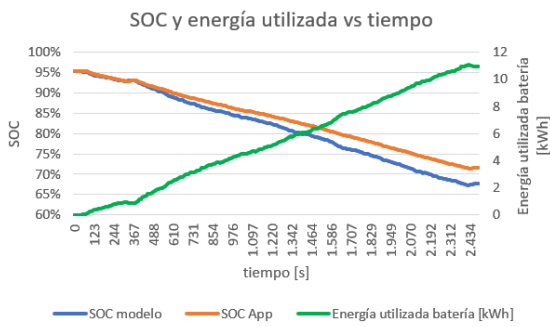


Figura B.37: Gráficos caracterización energética para ruta larga L7

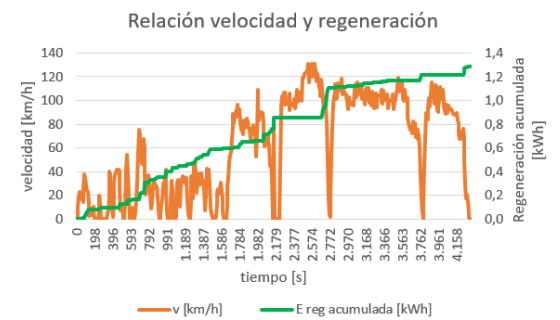
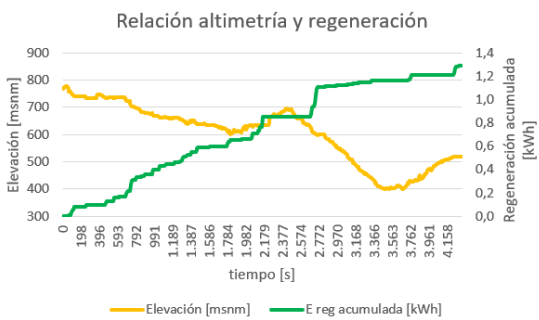
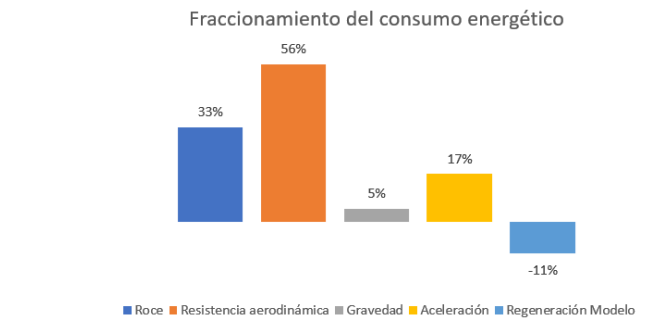
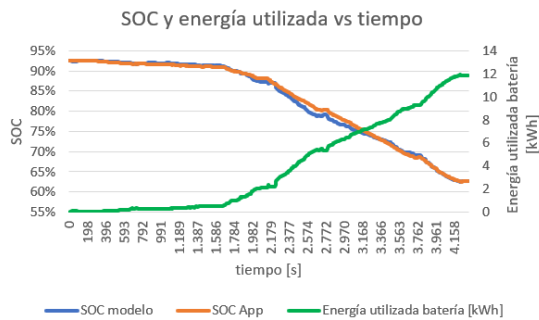
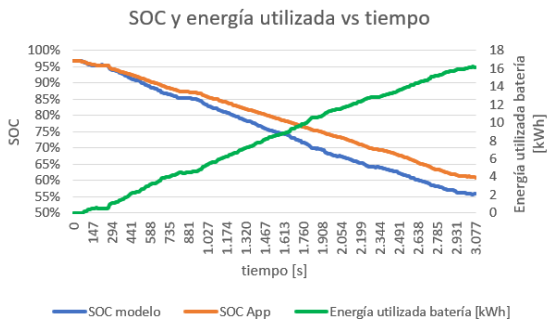
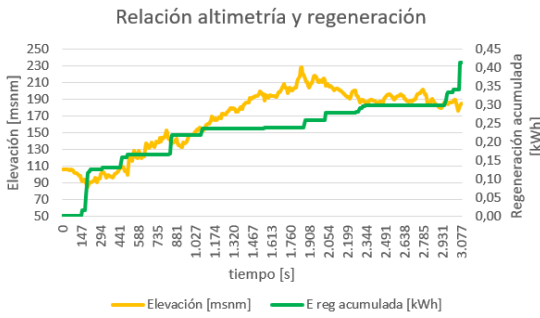
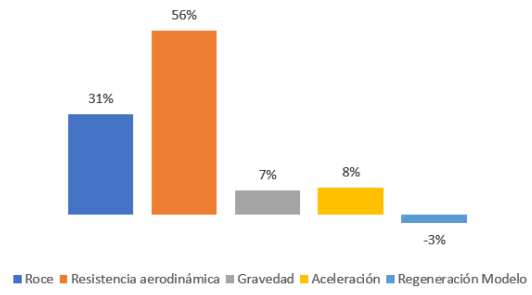


Figura B.38: Gráficos caracterización energética para ruta larga L9



Fraccionamiento del consumo energético



Relación velocidad y regeneración

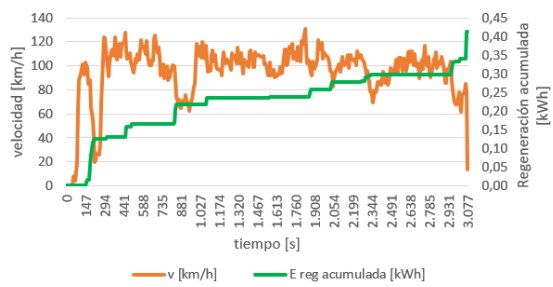
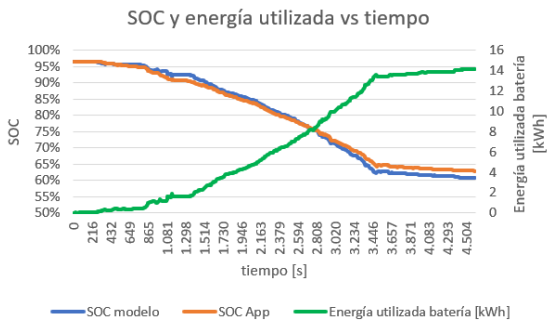
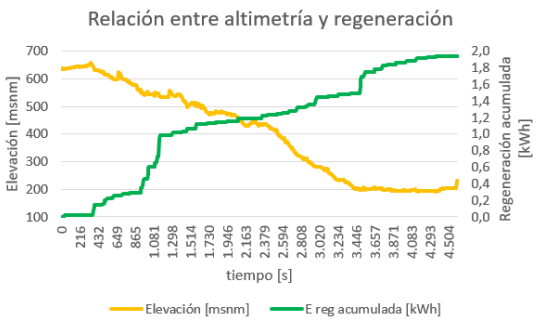
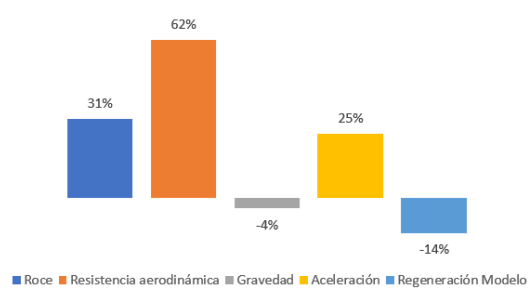


Figura B.39: Gráficos caracterización energética para ruta larga L10



Fraccionamiento del consumo energético



Relación entre velocidad y regeneración

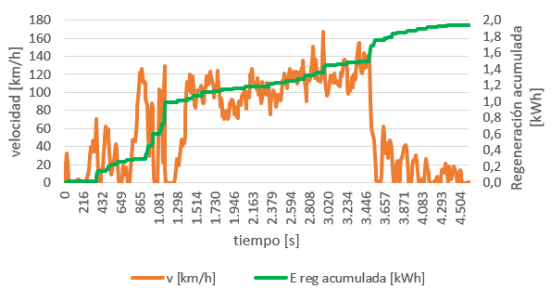


Figura B.40: Gráficos caracterización energética para ruta larga L11

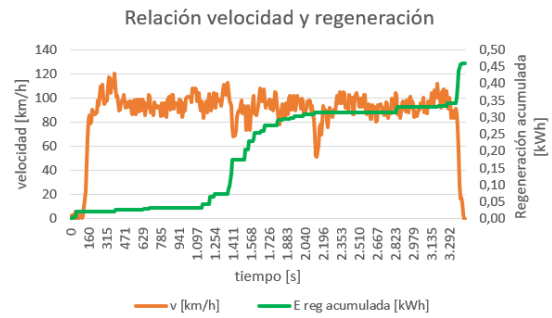
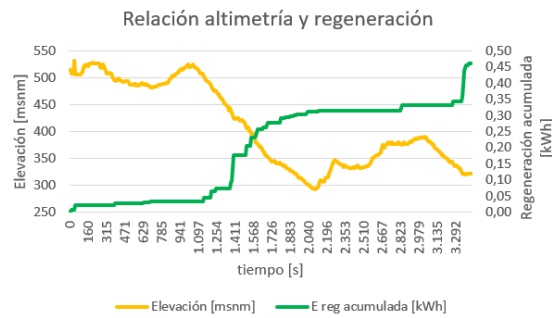
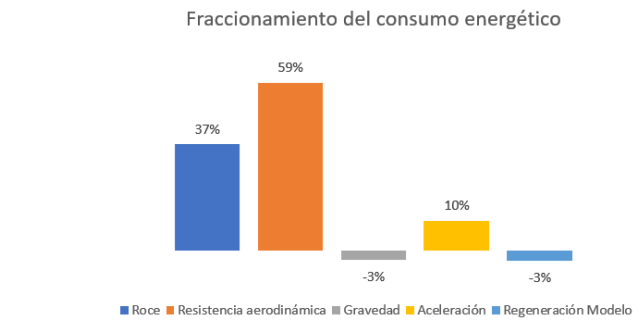
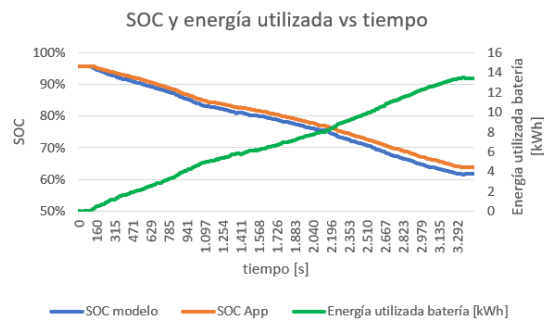


Figura B.41: Gráficos caracterización energética para ruta larga L12

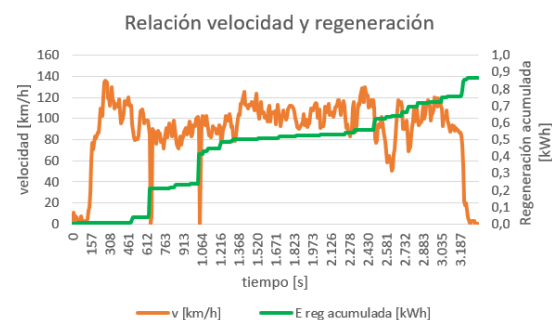
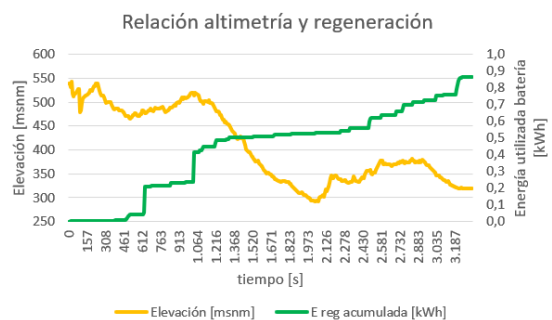
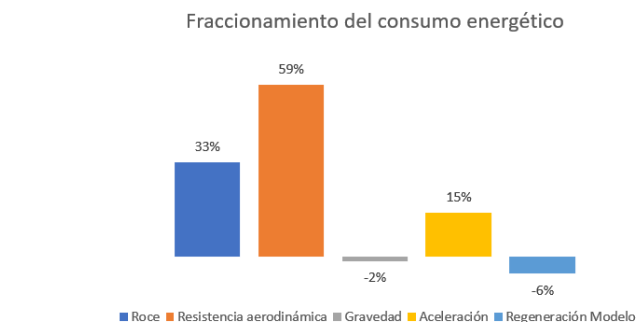
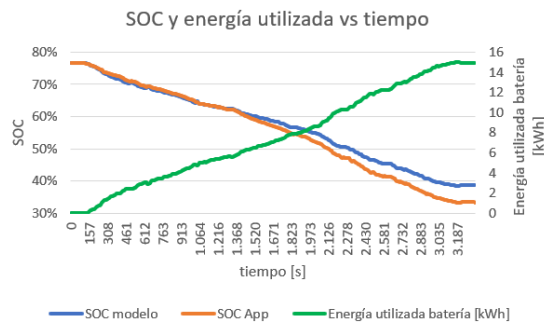


Figura B.42: Gráficos caracterización energética para ruta larga L13

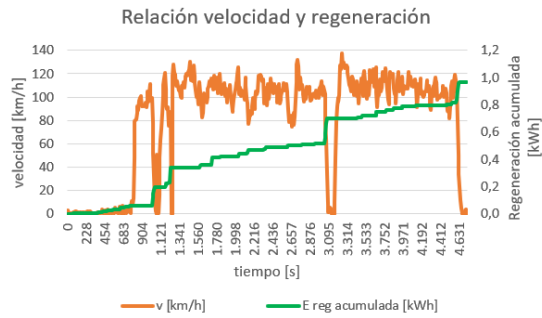
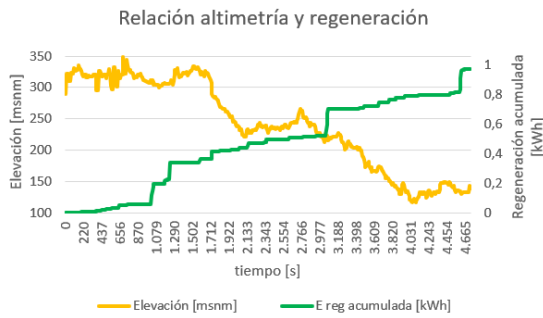
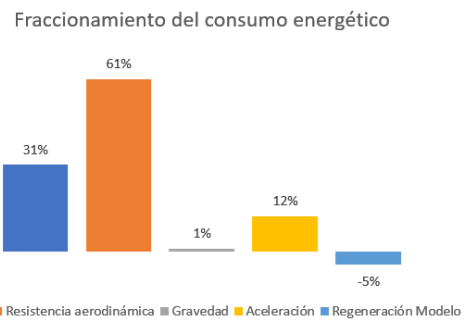
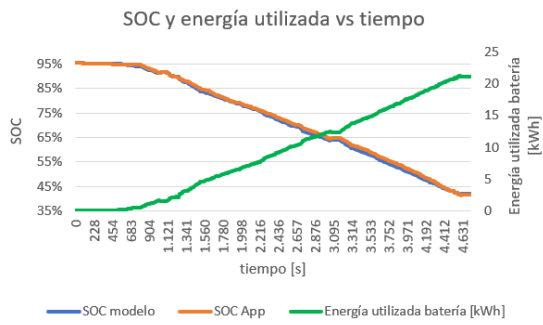


Figura B.43: Gráficos caracterización energética para ruta larga L14

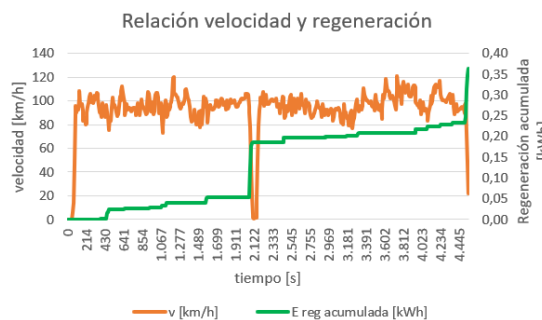
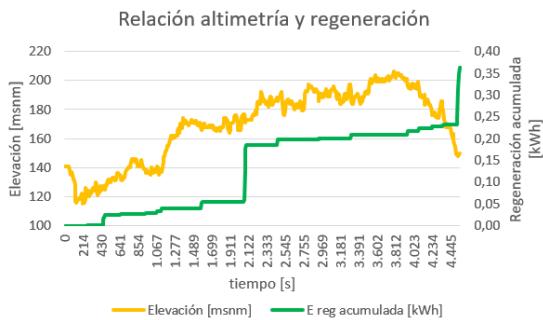
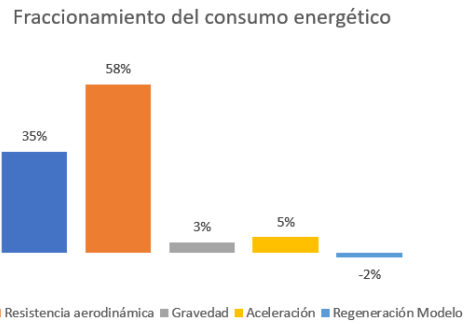
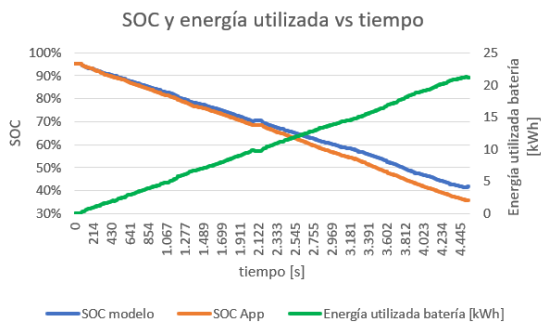


Figura B.44: Gráficos caracterización energética para ruta larga L15

Apéndice C

Código MATLAB para modelo de cuantificación de agresividad en la conducción

```
1 -   clc
2 -   clear all
3
4 -   % Determinar frecuencia objetivo %
5 -   % Utilización señal de velocidad %
6
7 -   Ruta = 'AgenciaSE-Costanera.xlsx';
8
9 -   t = xlsread(Ruta,'Hojal','D3:D28');
10
11 -   t_m = t(2);
12 -   for i = 2:length(t)
13 -       t_aux = t(i) - t(i-1);
14 -       t_m = [t_m, t_aux]; % paso de tiempo
15 -   end
16
17 -   v_m = xlsread(Ruta,'Hojal','I3:I28');
18 -   a_m = xlsread(Ruta,'Hojal','K3:K28');
19 -   j_m = xlsread(Ruta,'Hojal','L3:L28');
20 -   l_v_m = length(v_m);
21
22 -   % Borrar periodos de inactividad %
23 -   v_s0 = [];
24 -   for i = 1:l_v_m
25 -       if v_m(i) == 0;
26 -           v_s0 = v_s0;
27 -       else
28 -           v_s0 = [v_s0, v_m(i)];
29 -       end
30 -   end
31
32 -   v_s0_prom = mean(v_s0) * 3.6
33
34 -   l_v_s0 = length(v_s0);
35
36 -   % Ajuste promedio %
37
38 -   v_m_mean = mean(v_s0); % promedio con datos sin periodos de inactividad
39
40 -   v_s0_adj = v_s0 - v_m_mean * ones(1,l_v_s0); % ajuste promedio
```

```

41
42     % Periodogram %
43
44 -   x_v = v_s0_adj;
45
46 -   N = length(x_v);
47 -   T = mean(t_m); % paso de tiempo promedio
48 -   k = 0:1:N-1;
49 -   f_s = 1/T;
50
51 -   f_real = (f_s / N) * k;
52
53 -   t_fourier = fft(x_v);
54 -   amp_v = abs(t_fourier);
55
56
57     % Perodograma total %
58 -   figure
59 -   plot(f_real,amp_v);
60 -   xlim([0,f_s/2])
61 -   title('Periodograma perfil de velocidad - La Pirámide')
62 -   xlabel('Frecuencia [Hz]')
63 -   ylabel('Periodograma [m2/s2/Hz]')
64
65
66     % integral %
67
68 -   suma = [];
69 -   for i = 1:round((N-1)/2)
70 -       sum_aux = amp_v(i) * (f_real(i+1) - f_real(i));
71 -       suma = [suma, sum_aux]; % suma de cada área del rectangulito
72 -   end
73
74 -   área_curva = sum(suma); % suma de todos los rectangulitos
75
76 -   prop = 0;
77 -   cutoff_freq = [];
78 -   cont = [];
79 -   for i = 1:round((N-1)/2)
80 -       if prop / área_curva < 0.90 % proporción menor a 0.90 se sigue avanzando por las frecuencias

```

```

81 -         prop = prop + suma(i);
82 -     else
83 -         cutoff_freq_aux = f_real(i);
84 -         cutoff_freq = [cutoff_freq, cutoff_freq_aux]; % vector que guarda todas las frecuencias ripples
85 -         cont_aux = i; % rescata el contador del cutoff
86 -         cont = [cont, cont_aux]; % guarda los contadores desde el cutoff
87 -     end
88 - end
89
90 - cutoff_frequency = cutoff_freq(1) % frecuencia cutoff
91
92 - %%%%%%%%%%%
93
94 - cut_freq = 0.0437; % Parámetro de entrada
95 - cont2 = [];
96 - for j = 1:round((N-1)/2)
97 -     if f_real(j) >= cut_freq
98 -         cont2_aux = j;
99 -         cont2 = [cont2, cont2_aux]; % guarda los contadores desde el cutoff de todas las rutas
100 -     else
101 -     end
102 - end
103
104 - %%%%%%%%%%%
105
106 - % Periodograma en estado Ripples %
107 - figure
108 - plot(f_real, amp_v);
109 - xlim([cutoff_frequency, f_s/2])
110 - title('Periodograma perfil de velocidad - La Pirámide Estado Ripple')
111 - xlabel('Frecuencia [Hz]')
112 - ylabel('Periodograma [m^{2}/s^{2}/Hz]')
113
114 - %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
115
116 - % Ripple Aggressiveness %
117 - % Utilización de señal de jerk %
118
119 - j_m = xlsread(Ruta, 'Hojal', 'L3:L28');
120 - l_j_m = length(j_m);

```

```

121
122     % Borrar periodos de inactividad %
123     j_s0 = [];
124     for i = 1:l_j_m
125         if j_m(i) == 0;
126             j_s0 = j_s0;
127         else
128             j_s0 = [j_s0, j_m(i)];
129         end
130     end
131     l_j_s0 = length(j_s0);
132
133     % Ajuste promedio %
134     j_m_mean = mean(j_s0);
135
136     j_s0_adj = j_s0 - j_m_mean * ones(1,l_j_s0);
137     % Periodograma %
138     x_j = j_s0_adj;
139
140     N = length(x_j);
141     T = mean(t_m); % Varía dependiendo de la frecuencia de muestreo %
142     k = 0:1:N-1;
143     f_s = 1/T;
144     f_real = (f_s / N) * k;
145     t_fourier = fft(x_j);
146     amp_j = abs(t_fourier);
147
148     % Peroidograma total %
149     figure
150     plot(f_real,amp_j);
151     xlim([0,f_s/2])
152     title('Periodograma perfil de jerk - La Pirámide')
153     xlabel('Frecuencia [Hz]')
154     ylabel('Periodograma [m^{2}/s^{6}/Hz]')
155
156     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
157     % Cálculo métrica RA %
158     HF = sum(amp_j(min(cont2):round((N-1)/2)))
159     LF = sum(amp_j(1:min(cont2)-1))
160     RA = HF / (LF + HF)

```

Figura C.1: Código de programación para determinación de frecuencia de corte y *Ripple Aggressiveness*.

Apéndice D

Gráficos de dispersión de la relación
entre indicadores energéticos y RA

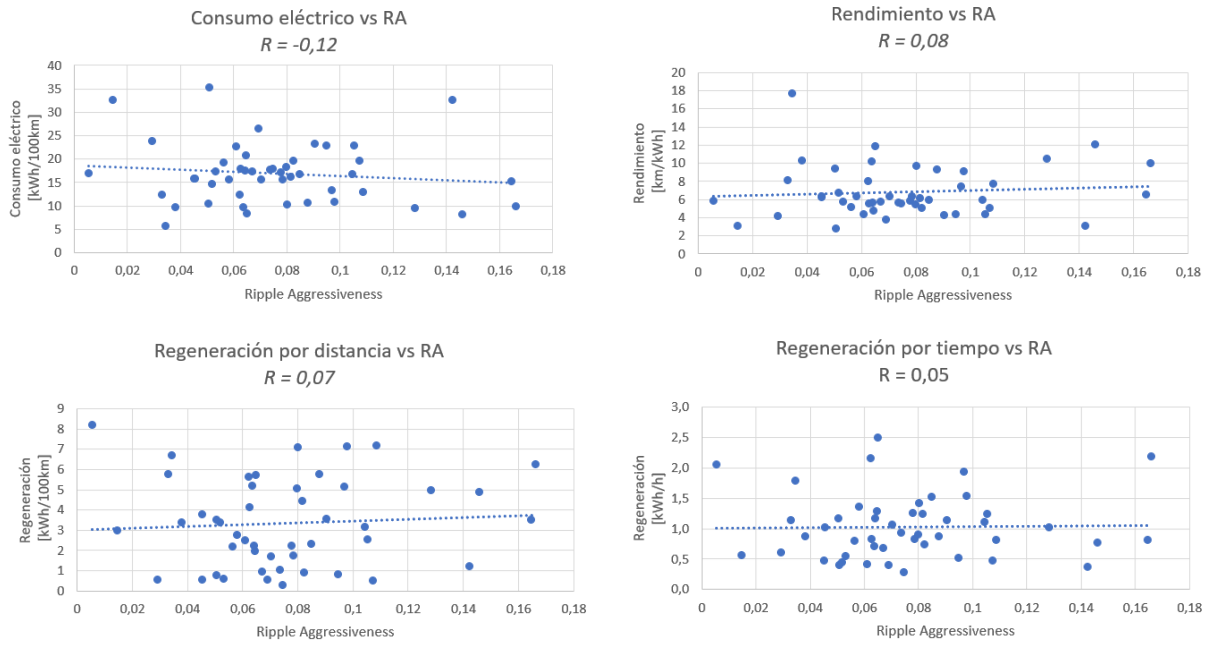


Figura D.1: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y *Ripple Aggressiveness* para todas las rutas.

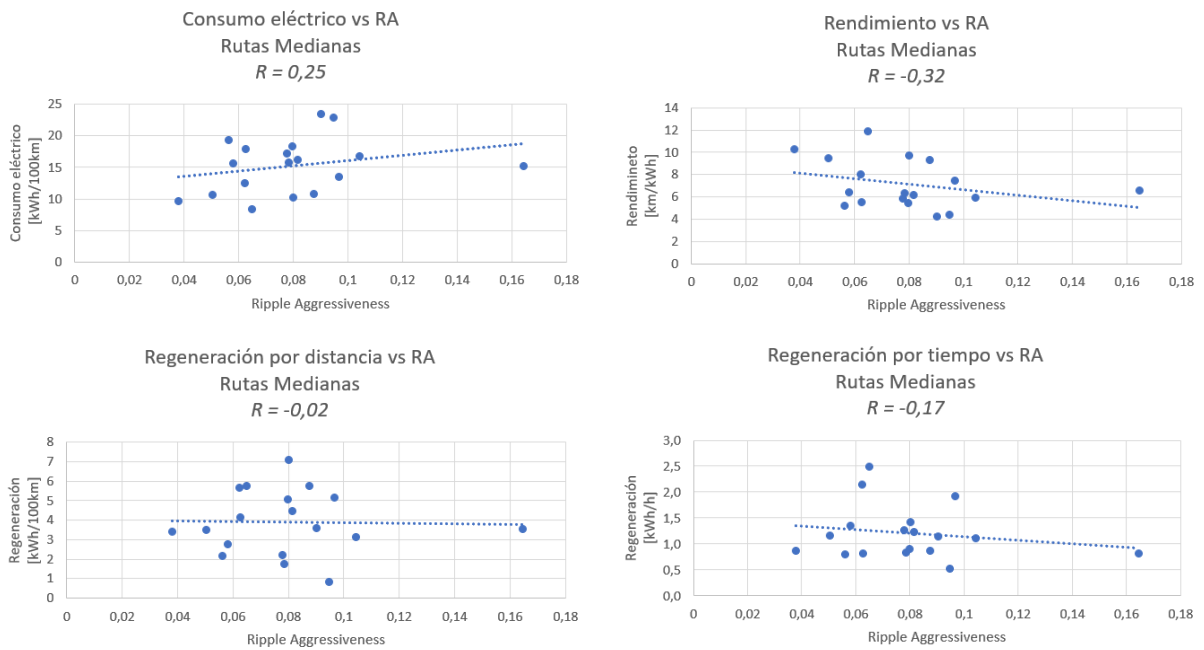


Figura D.2: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y *Ripple Aggressiveness* en Caso 2 para Rutas Medianas.

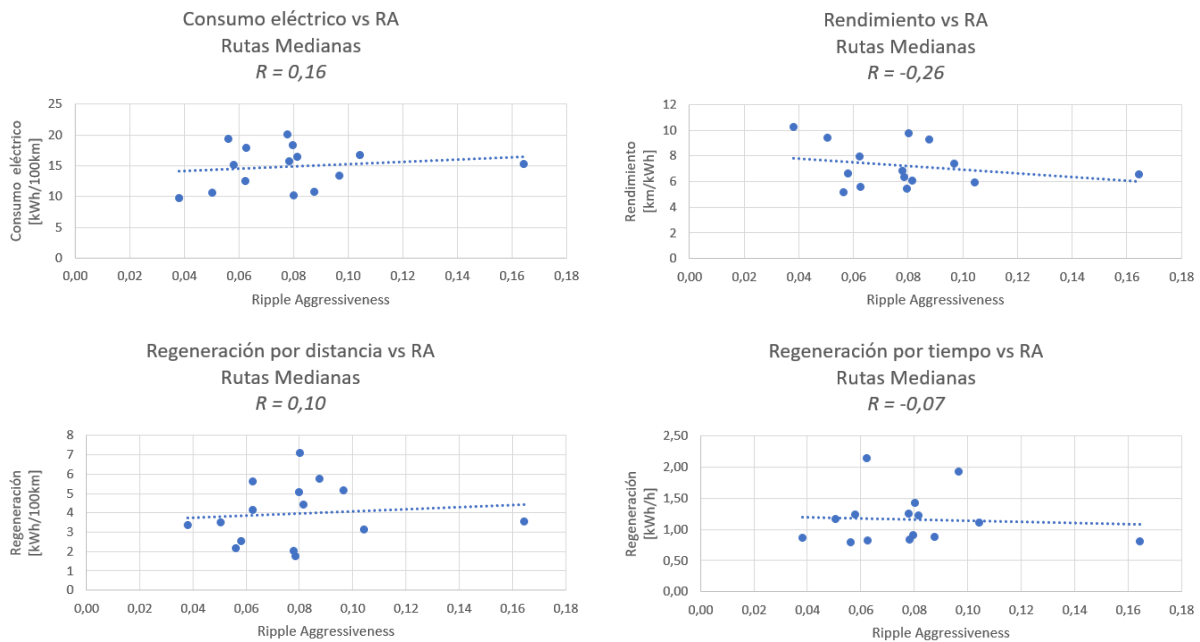


Figura D.3: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y *Ripple Aggressiveness* en Caso 3 para Rutas Medianas.

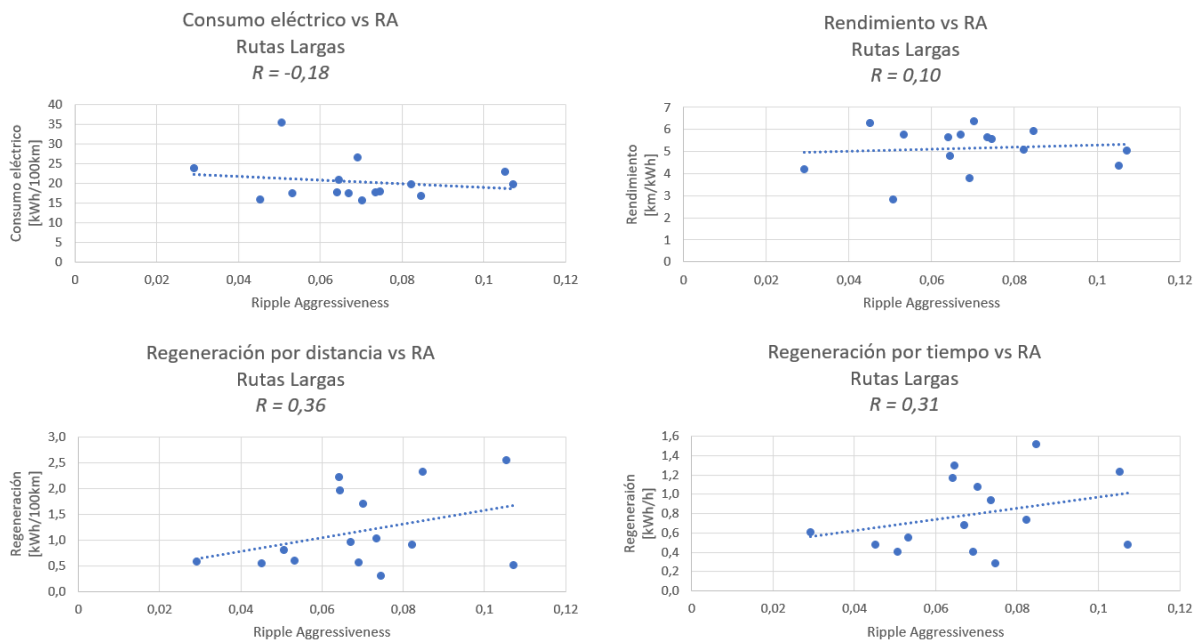


Figura D.4: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y *Ripple Aggressiveness* en Caso 2 para Rutas Largas.

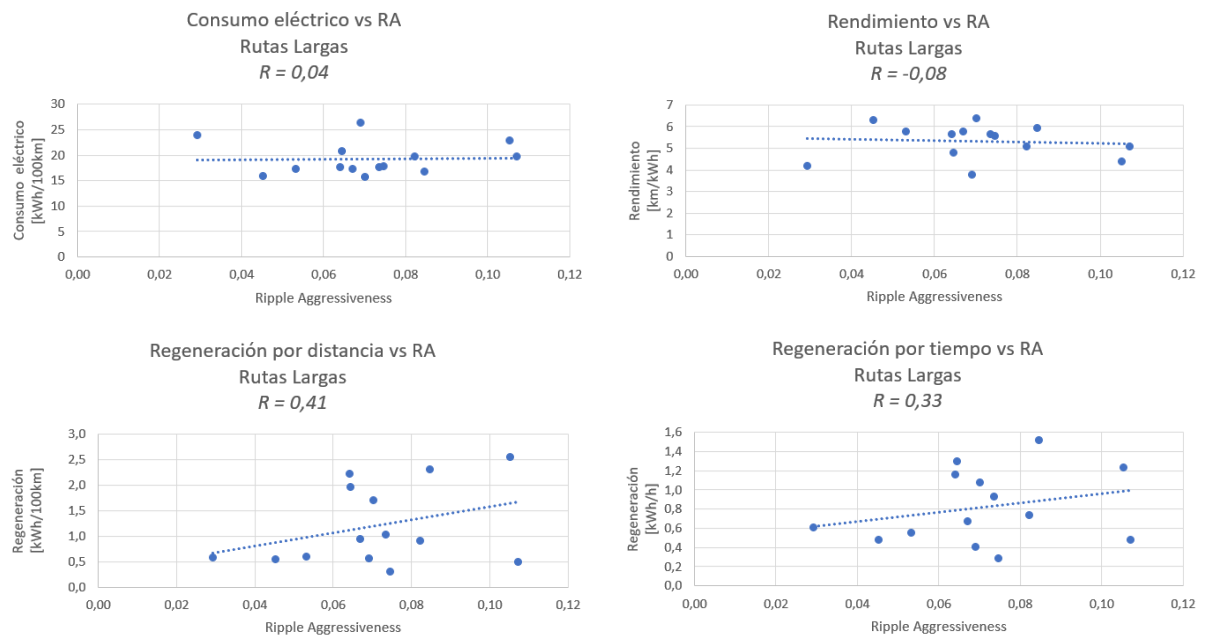


Figura D.5: Gráficos de dispersión de indicadores energéticos y *Ripple Aggressiveness* en Caso 3 para Rutas Largas.

Apéndice E

Código MATLAB implementación modelo de degradación

```
1 - clear all
2 - clc
3 - %%% Modelo Degradación batería %%%
4
5 - % Factores de escala 30% degradación %
6
7 - fact_esc=[1.000054 1.000037 1.000043 1.000024 1.000008 1.000019 1 1.000011 1.000003 0.999989 1.000027];
8
9 - % K-Nearest neighbor %
10
11 - ave_sr = [0.125 0.25 0.375 0.375 0.5 0.5 0.5 0.625 0.625 0.75 0.875];
12 - soc_swing = [0.25 0.5 0.25 0.75 0.25 0.5 1 0.25 0.75 0.5 0.25];
13
14 - % SOC en PORCENTAJE %
15
16 - soc_inicial = 95; % Parámetro de entrada
17 - soc_final = 42; % Parámetro de entrada
18
19 - soc_i = soc_inicial/100;
20 - soc_f = soc_final/100;
21
22 - sr = (soc_i + soc_f)/2;
23 - delta_soc = soc_i - soc_f;
24
25 - figure
26 - hold on
27 - plot(ave_sr,soc_swing,'*')
28 - plot(sr,delta_soc,'o')
29 - hold off
30
31 - distancias = [];
32 - for i = 1:length(ave_sr)
33 -     x = ave_sr(i) - sr;
34 -     y = soc_swing(i) - delta_soc;
35 -     d_aux = sqrt(x^2 + y^2);
36 -     distancias = [distancias d_aux];
37 - end
38
39 - % Determinar 3 vecinos más cercanos %
40
```

```

41 - d_ordenado = sort(distancias);
42 -
43 - cont_ncercanos = [];
44 - for j = 1:length(distancias)
45 -     if distancias(j) == d_ordenado(1);
46 -         cont_ncercanos = [cont_ncercanos j];
47 -     end
48 -     if distancias(j) == d_ordenado(2);
49 -         cont_ncercanos = [cont_ncercanos j];
50 -     end
51 -     if distancias(j) == d_ordenado(3);
52 -         cont_ncercanos = [cont_ncercanos j];
53 -     end
54 - end
55 -
56 - % determina los contadores de los 3 vecinos más cercanos
57 -
58 - cont_3cercanos = [cont_ncercanos(1)];
59 - for k = 2:length(cont_ncercanos)
60 -     if cont_ncercanos(k) == cont_3cercanos(length(cont_3cercanos));
61 -         cont_3cercanos;
62 -     else
63 -         cont_3cercanos = [cont_3cercanos cont_ncercanos(k)];
64 -     end
65 - end
66 -
67 - % Factor de escala caída SOC ruta %
68 -
69 - d1 = distancias(cont_3cercanos(1));
70 - d2 = distancias(cont_3cercanos(2));
71 - d3 = distancias(cont_3cercanos(3));
72 -
73 - factor_escala = ((1/d1)*fact_esc(cont_3cercanos(1))+(1/d2)*fact_esc(cont_3cercanos(2))+(1/d3)*
74 - fact_esc(cont_3cercanos(3)))/((1/d1)+(1/d2)+(1/d3));
75 -
76 - % Eficiencia Coulombica %
77 -
78 - ciclos_fab = 2500;
79 - criterio_deg = 0.7;
80 - eta_barra = criterio_deg ^ (1/ciclos_fab);

```

```

81 - eta_ajustado = factor_escala * eta_barra;
82
83 - % Cálculo de esperanza de vida %
84
85 - capac_inicial = 110;
86
87 - capacidades = [capac_inicial];
88 - for i = 2:ciclos_fab
89 -     capac_aux = eta_ajustado * capacidades(i-1);
90 -     capacidades = [capacidades capac_aux];
91 - end
92
93 - figure
94 - plot(capacidades)
95
96 - % Cálculo ciclos al 70% SOH %
97
98 - capacidades_tot = [capac_inicial];
99 - for i = 2:2*ciclos_fab
100 -     capac_aux = eta_ajustado * capacidades_tot(i-1);
101 -     capacidades_tot = [capacidades_tot capac_aux];
102 - end
103
104 - figure
105 - plot(capacidades_tot)
106
107 - % Determinación cantidad de ciclos a la degradación
108
109 - ciclo_deg = [];
110 - for j = 1:length(capacidades_tot)
111 -     if capacidades_tot(j) >= criterio_deg * capac_inicial
112 -
113 -     else
114 -         ciclo_deg = [ciclo_deg j];
115 -     end
116 - end
117
118 - ciclo_deg(1)

```

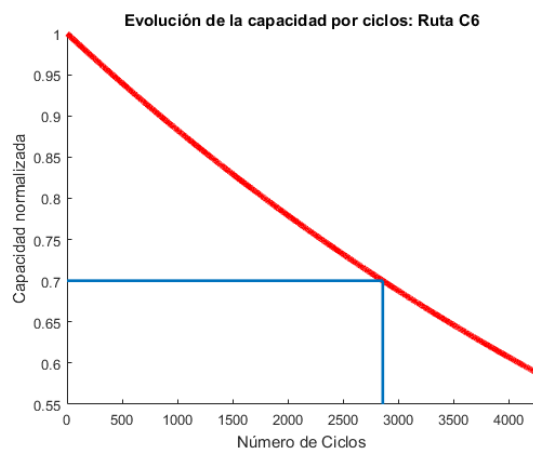
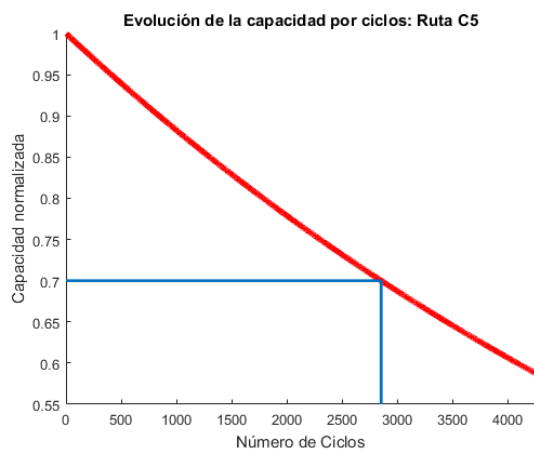
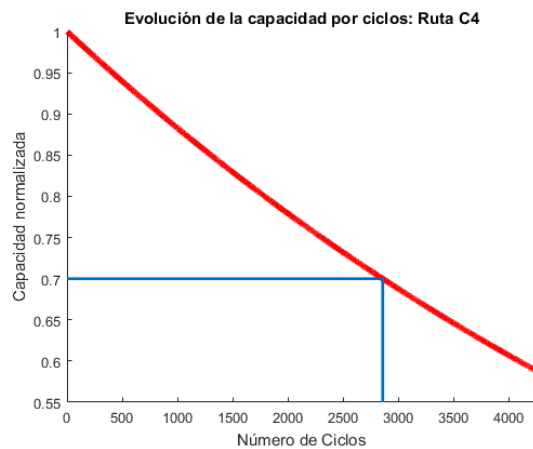
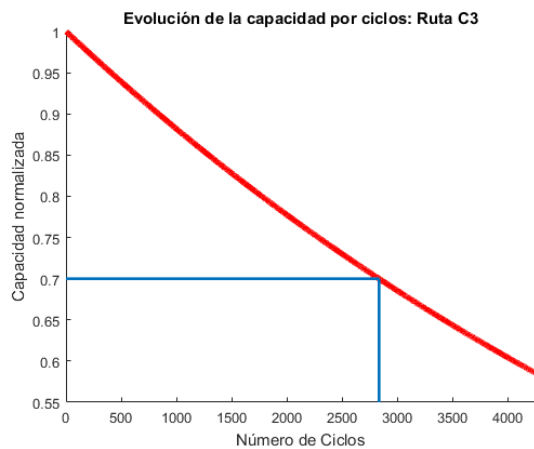
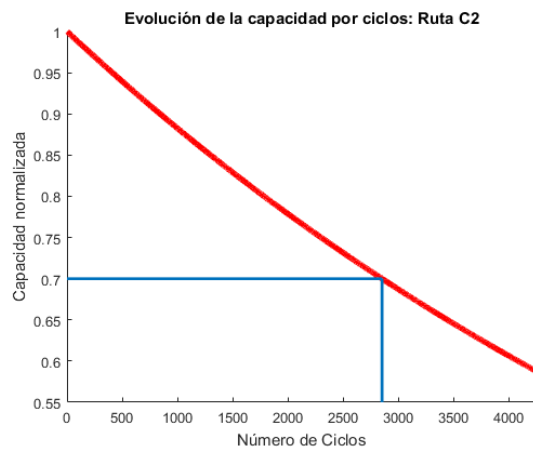
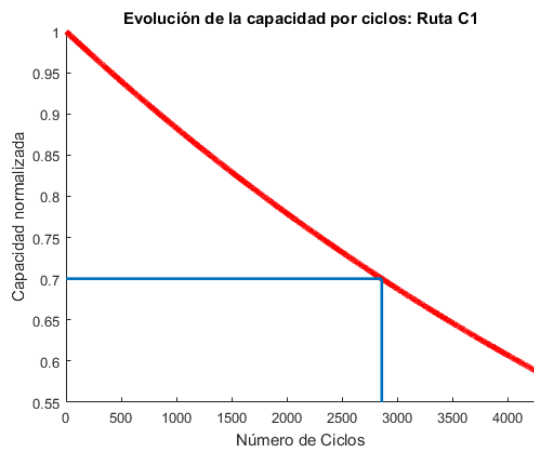
Figura E.1: Código de programación para determinación de número de ciclos a la degradación.

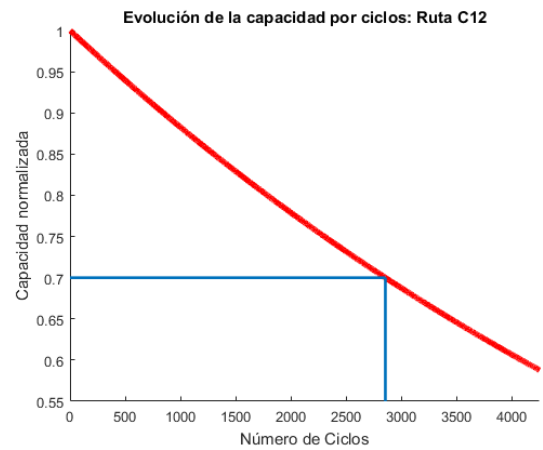
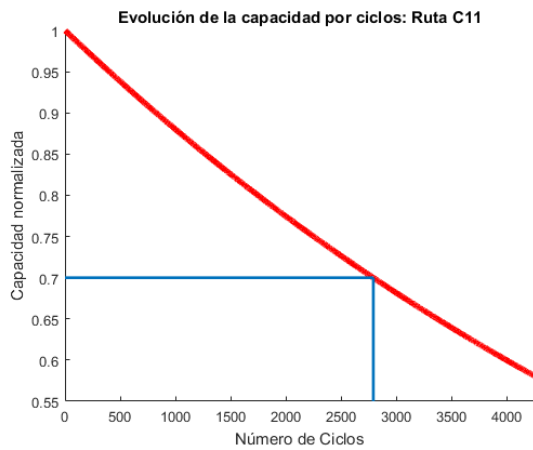
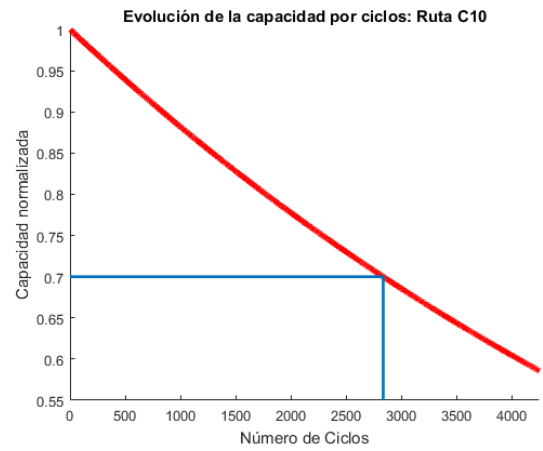
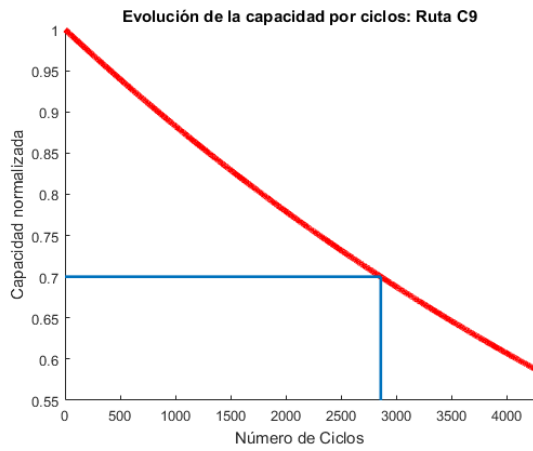
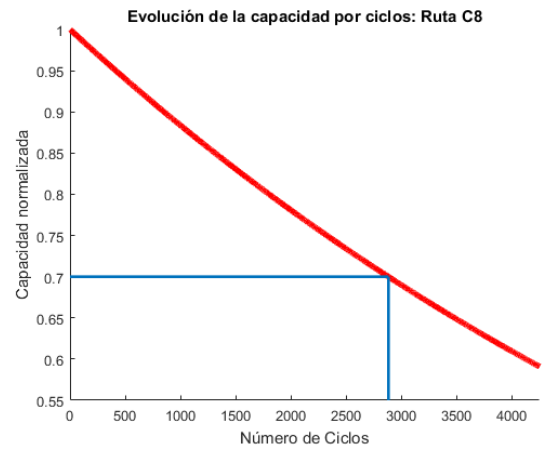
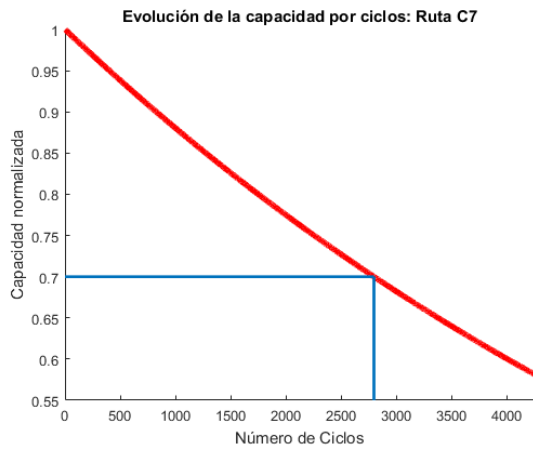
Apéndice F

Evolución de la capacidad por ciclos para todas las rutas

Tabla F.1: Número de ciclos al 70% de capacidad de todas las rutas.

| Número de ciclos al 70% capacidad | | | |
|-----------------------------------|--------------|----------------|--------------|
| | Rutas Cortas | Rutas Medianas | Rutas Largas |
| 1 | 2.858 | 2.826 | 2.755 |
| 2 | 2.851 | 2.819 | 2.758 |
| 3 | 2.833 | 2.861 | 2.663 |
| 4 | 2.857 | 2.953 | 2.728 |
| 5 | 2.852 | 2.771 | 2.848 |
| 6 | 2.858 | 2.816 | 2.813 |
| 7 | 2.796 | 2.835 | 2.839 |
| 8 | 2.882 | 3.324 | 2.784 |
| 9 | 2.858 | 2.906 | 2.747 |
| 10 | 2.834 | 3.331 | 2.565 |
| 11 | 2.790 | 2.805 | 2.673 |
| 12 | 2.854 | 2.789 | 2.706 |
| 13 | 2.965 | 2.901 | 2.746 |
| 14 | 2.794 | 3.455 | 2.473 |
| 15 | - | 3.336 | 2.473 |
| 16 | - | 2.853 | - |
| 17 | - | 2.773 | - |
| 18 | - | 2.853 | - |





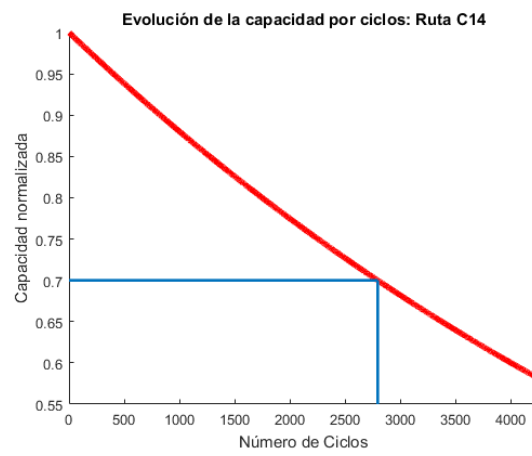
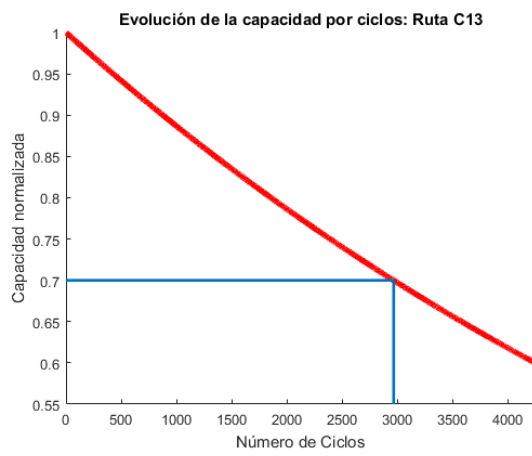
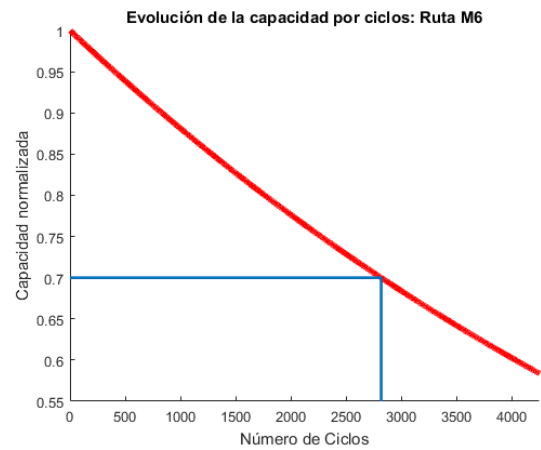
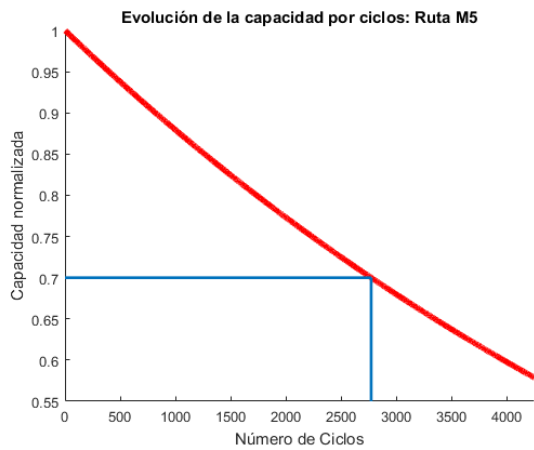
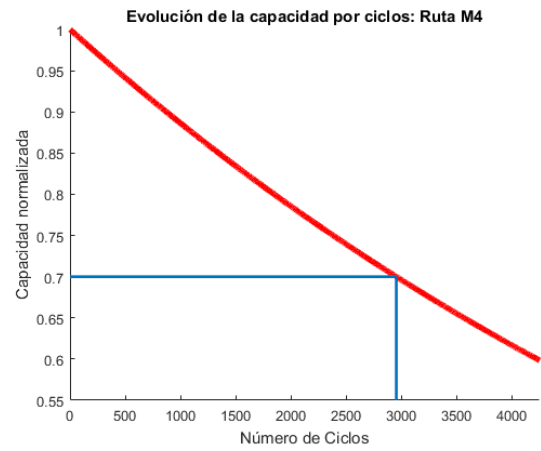
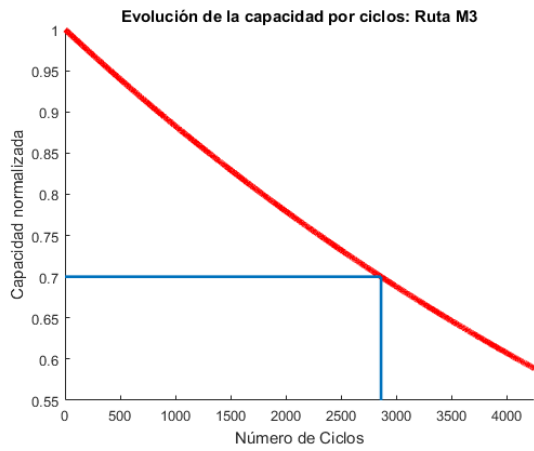
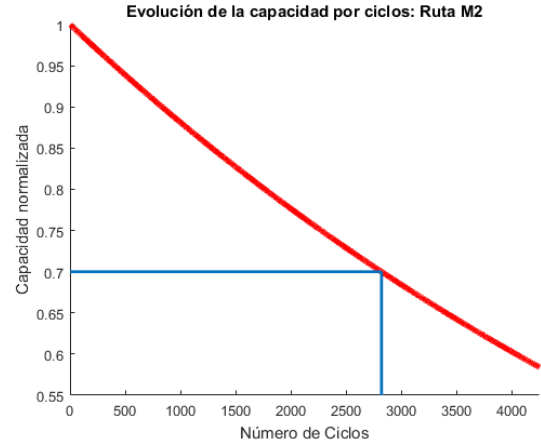
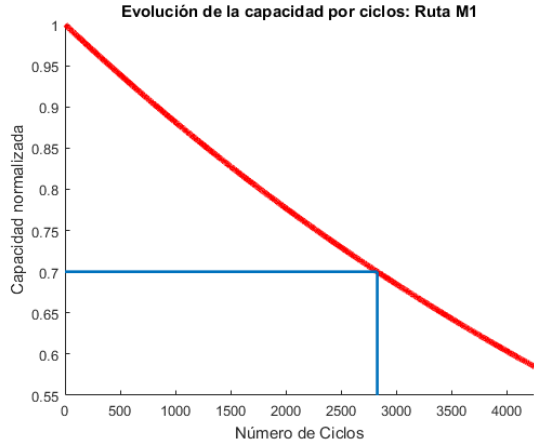
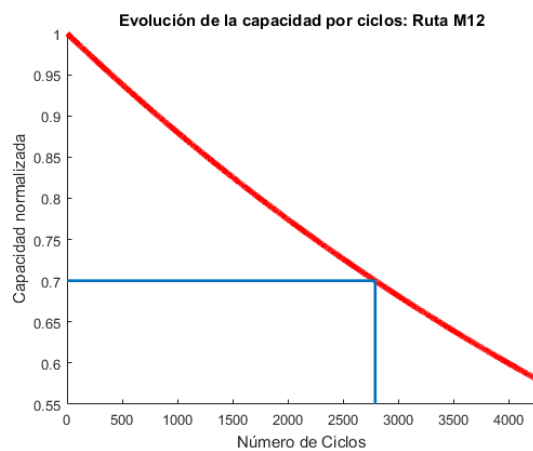
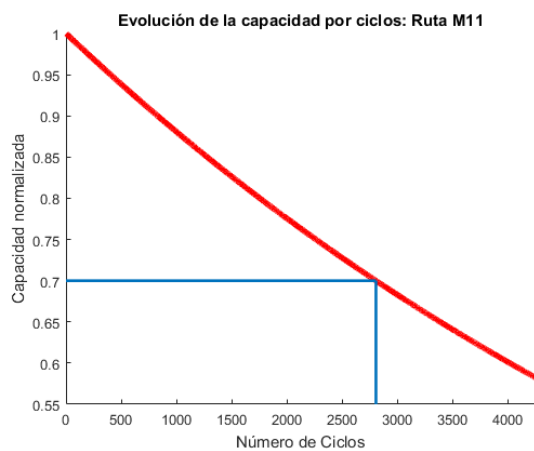
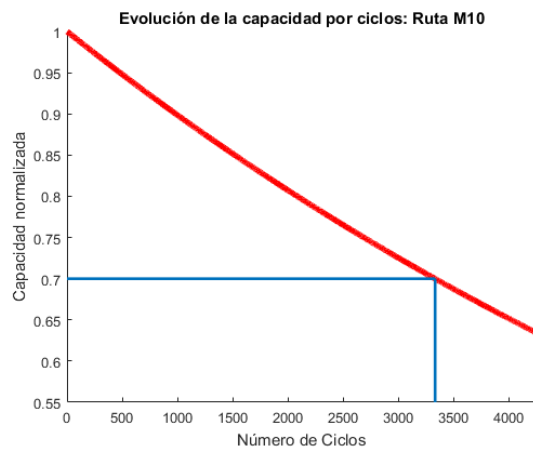
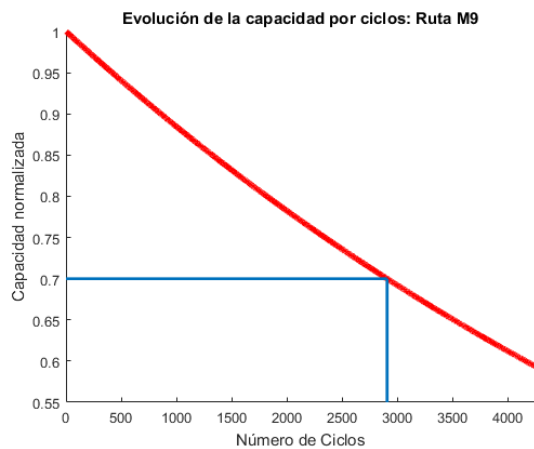
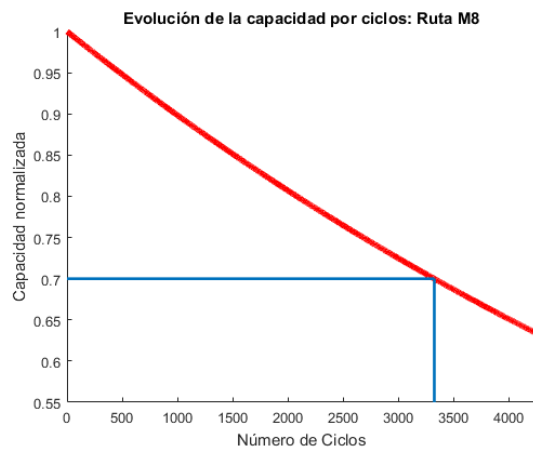
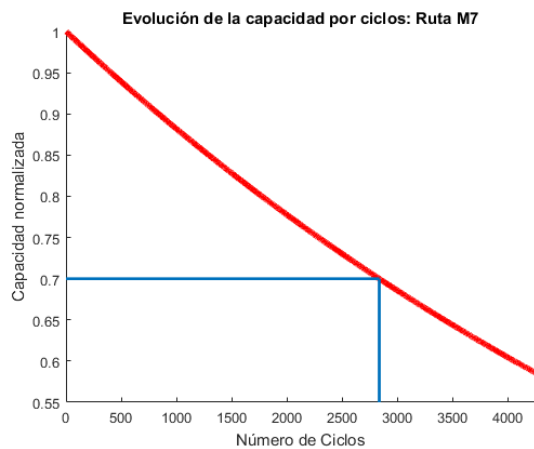


Figura F.1: Evolución de la capacidad por ciclos de Rutas Cortas





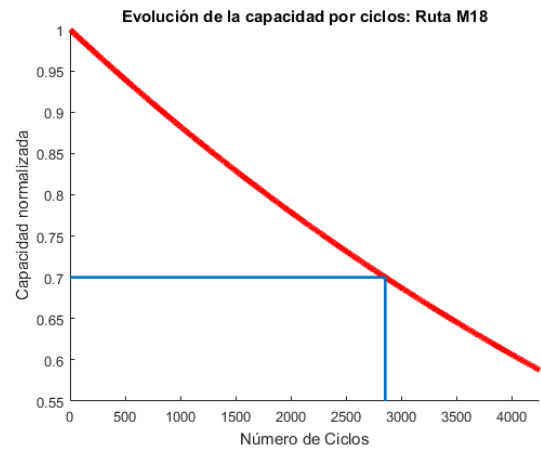
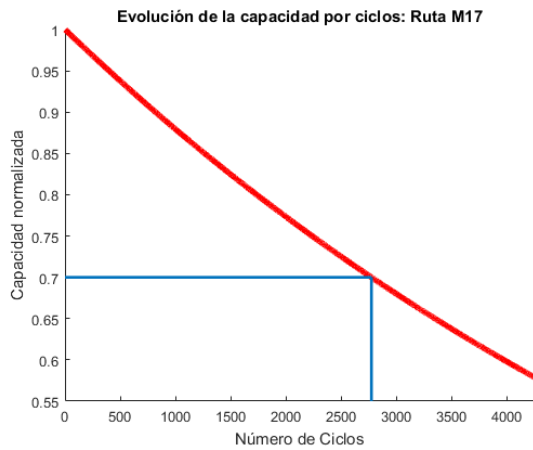
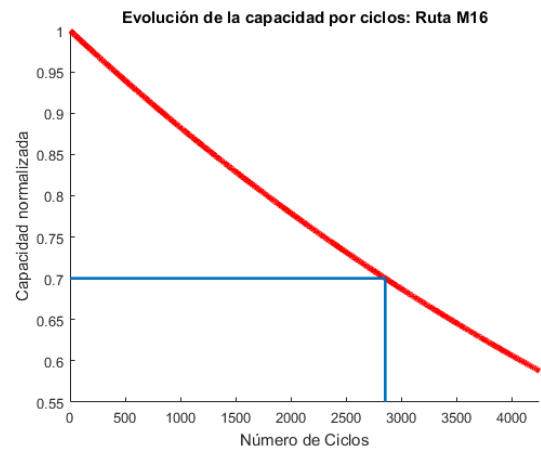
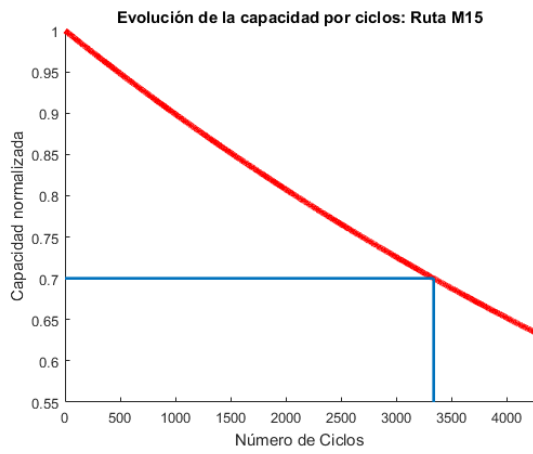
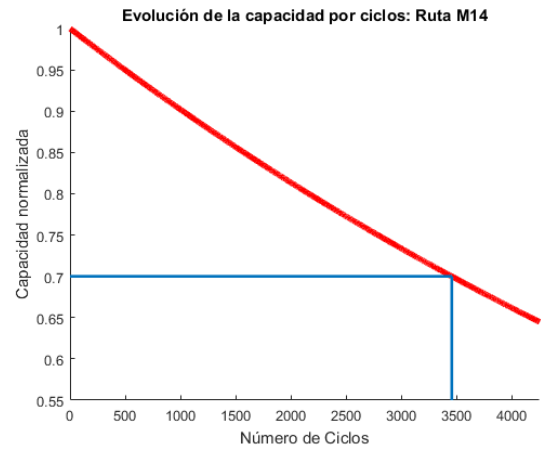
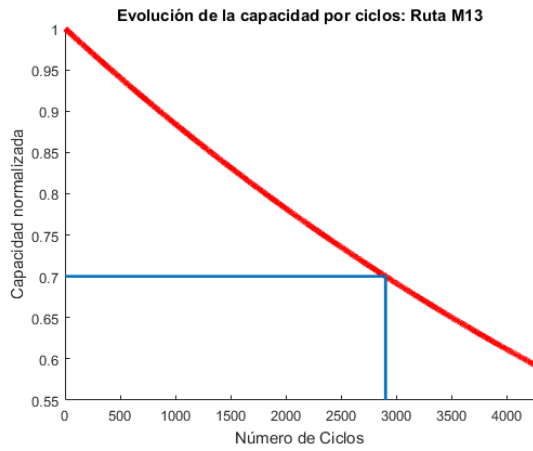
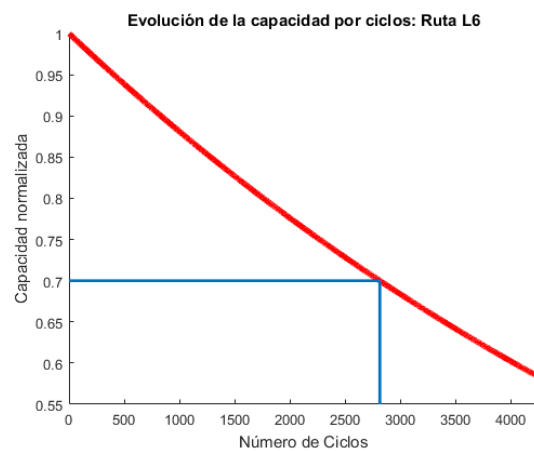
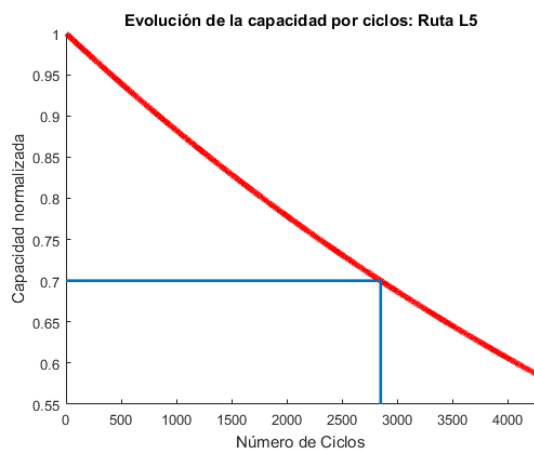
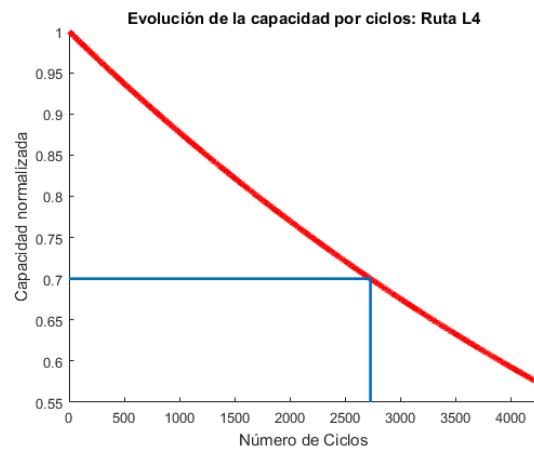
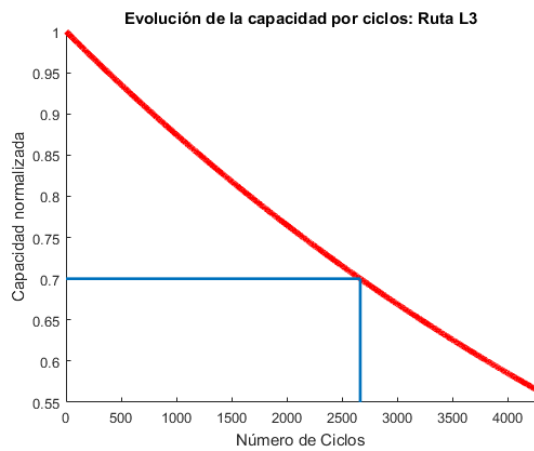
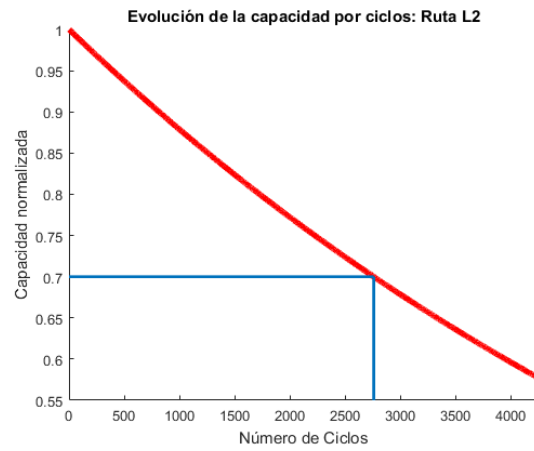
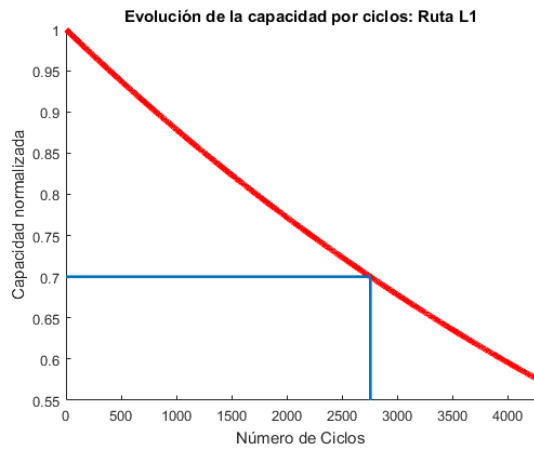
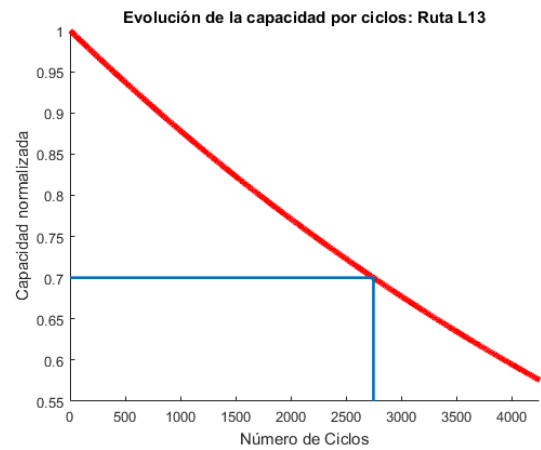
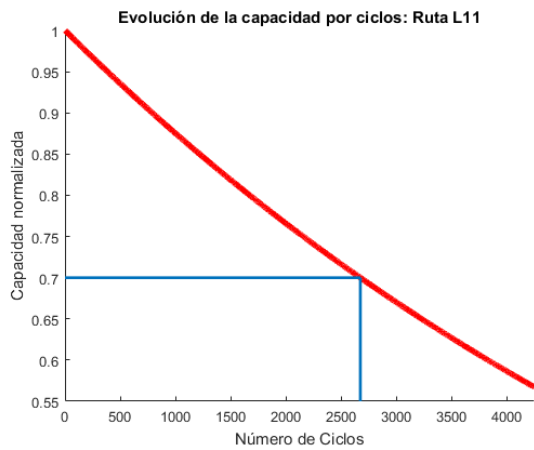
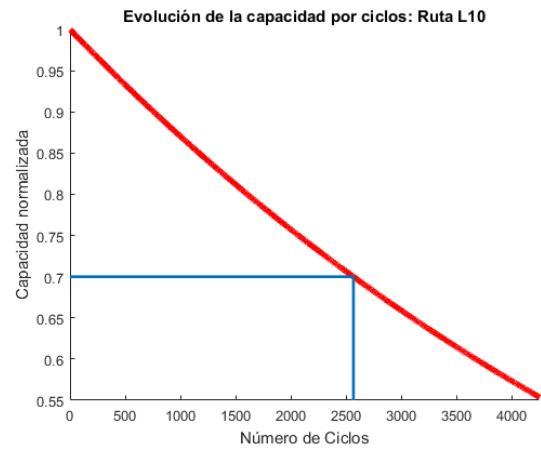
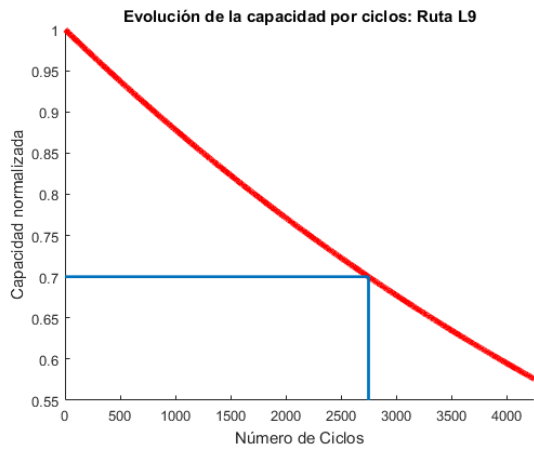
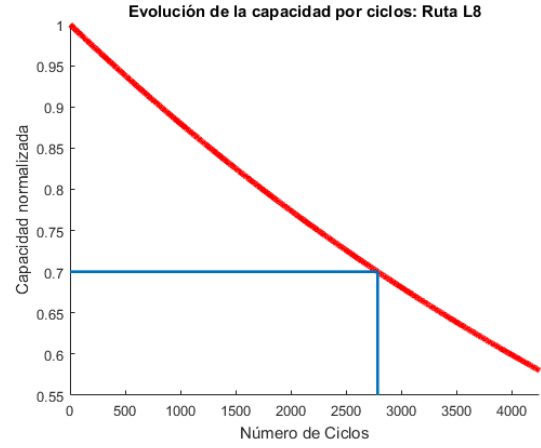
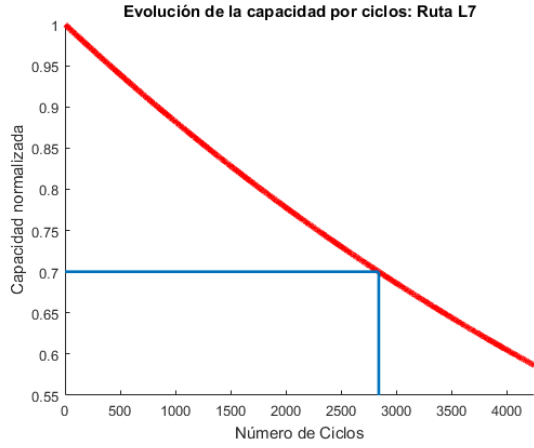


Figura F.2: Evolución de la capacidad por ciclos de Rutas Medianas





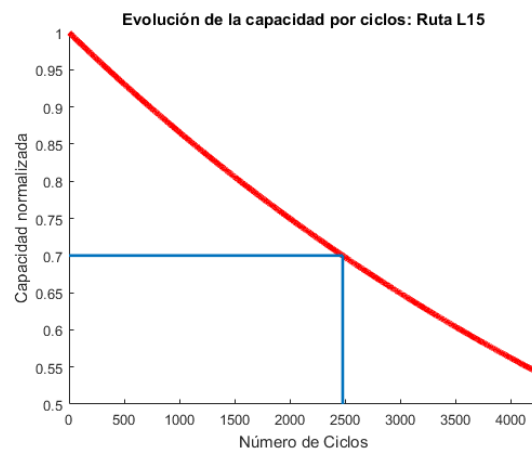
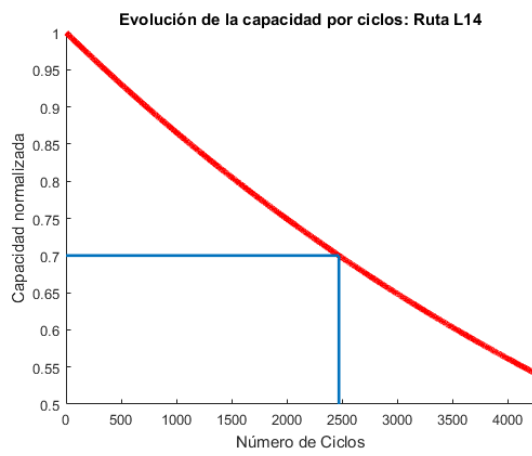


Figura F.3: Evolución de la capacidad por ciclos de Rutas Largas