



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO
AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL VEHÍCULO
ELÉCTRICO RENAULT TWIZY”**

**AUTORES: GÓMEZ OLMEDO CRISTIAN PATRICIO
OLMEDO BOLAÑOS VÍCTOR MAURICIO**

DIRECTOR: ING. FREDY ALEXANDER ROSERO OBANDO, PhD.

Ibarra, 2023

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO RENAULT TWIZY" presentado por el señor: Gómez Olmedo Cristian Patricio con número de cédula 1004320915 y el señor: Olmedo Bolaños Víctor Mauricio con número de cédula 1003427893, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 8 días del mes Mayo del 2023.

Atentamente



Ing. Fredy Rosero PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



AUTORIA DE RESPONSABILIDAD
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004320915		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Gómez Olmedo Cristian Patricio		
DIRECCIÓN:	Calle Río Amazonas y Las Vertientes. Atuntaqui		
EMAIL:	cpgomezo@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	-	TELÉFONO MOVIL:	096 964 6675

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003427893		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Olmedo Bolaños Víctor Mauricio		
DIRECCIÓN:	Vía Santa Rosa, San José. Atuntaqui		
EMAIL:	vmolmedob@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	06 2620 031	TELÉFONO MOVIL:	098 183 0633

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Análisis de la eficiencia energética del vehículo eléctrico Renault Twizy"
AUTORES:	Gómez Olmedo Cristian Patricio, Olmedo Bolaños Víctor Mauricio
FECHA:	08/05/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Fredy Rosero, PhD.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo, sin violar derechos del autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de mayo de 2023

LOS AUTORES:



Gomez Olmedo Cristian Patricio



Olmedo Bolaños Víctor Mauricio

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme por el camino correcto y ser aquello que me permite ser buena persona.

A mis padres Luis y Narcisa por ser la motivación principal durante todo el transcurso de mi carrera universitaria, ellos fueron quienes me impulsaron a no rendirme y continuar en este proceso.

A mis hermanos, familiares, amigos y todos aquellos quienes estuvieron en cada paso que conlleva llegar a la meta de alcanzar una profesión.

CRISTIAN GÓMEZ

A mis padres y hermano Marco y María y Richard, quienes han sido siempre un apoyo incondicional, y han sabido guiarme adecuadamente con el objetivo de alcanzar este logro en mi vida.

A mis familiares y amigos presentes durante mi proceso de formación, por estar pendientes de mí y ayudarme en los momentos que más lo necesitaba.

VÍCTOR OLMEDO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme una familia comprensiva y luchadora, por darme la oportunidad de ser perseverante y no decaer.

A mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental, y haber tenido un apoyo incondicional frente a cada adversidad.

A la Universidad Técnica del Norte por haberme permitido mi formación como profesional ético en esta ilustre carrera, a través de sus instalaciones y docentes de calidad.

Al ingeniero Fredy Rosero, director de este trabajo de grado, quien ha sabido guiar con compromiso, motivación y aporte de conocimiento todo el desarrollo del mismo, de igual forma al ingeniero Ramiro Rosero, por la paciencia, conocimiento y sabiduría brindada como asesor.

CRISTIAN GÓMEZ

Agradezco a Dios por darme el privilegio de tener una vida digna y unos padres unidos y trabajadores que nos ayudaron a salir adelante a mí y a mi hermano a pesar de las limitaciones.

Además, brindo mi agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, institución que me dio la oportunidad de desarrollar y terminar mis estudios en esta carrera.

Al ingeniero Fredy Rosero, quien nos motivó y brindó su conocimiento para lograr la finalización del presente trabajo de grado. Asimismo, agradezco al ingeniero Ramiro Rosero por el tiempo y sus enseñanzas aportadas en el desarrollo del mismo.

VÍCTOR OLMEDO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	xix
CAPÍTULO I	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Situación Actual	2
1.3 Prospectiva	3
1.4 Planteamiento del problema	4
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo General	4
1.5.2 Objetivos Específicos	4
1.6 Alcance	5
1.7 Justificación	5
1.8 Contexto	6
CAPÍTULO II	8
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 El Vehículo Eléctrico	8
2.2 Tren de potencia de un VEB	10
2.2.1 Cargador	10
2.2.2 Batería de tracción	10
2.2.2.1 Tipos de baterías para VE	11
2.2.2.2 Parámetros y comparaciones de la batería	13
2.2.2.3 Comparaciones de las distintas baterías	15
2.2.2.4 Consideraciones de vida útil de las baterías	16
2.2.3 Inversor	17
2.2.4 Motor eléctrico	19
2.2.4.1 Motor de corriente alterna (CA) asíncrono	19

2.2.4.2 Motor de corriente alterna (CA) síncrono	21
2.2.5 Reductor	21
2.2.6 Freno regenerativo	22
2.3 Eficiencia energética de los vehículos eléctricos	23
2.4 Balances energéticos en el vehículo	25
2.4.1 Dinámica del vehículo	25
2.4.1.1 Resistencia a la rodadura	26
2.4.1.2 Resistencia aerodinámica	27
2.4.1.3 Resistencia a pendientes	28
2.4.1.4 Fuerza de la aceleración lineal	29
2.4.1.5 Fuerza de la aceleración angular	29
2.4.2 Potencia y Energía	29
2.4.2.1 Potencia de tracción	29
2.4.2.2 Potencia del motor eléctrico	30
CAPÍTULO III	31
3. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1 Definición Marco Metodológico	31
3.2 Selección de ruta de ensayo	33
3.3 Selección del vehículo e instrumentación	34
3.3.1 Renault Twizy	34
3.3.2 Instrumentación	36
3.3.2.1 Instrumentación para la obtención de parámetros cinemáticos del vehículo durante la conducción.	36
3.3.2.2 Instrumentación para la toma de datos que intervienen en la eficiencia del vehículo	38
3.4 Levantamiento de datos en ruta	39
3.4.1 Consideraciones para las pruebas en ruta	39
3.4.2 Configuración e instalación de los equipos	40
3.4.2.1 GPS Data logger	40
3.4.2.2 Scanner Autel MaxiCheck MX808	41
3.4.2.3 Analizador de energía AEMC 8335	43

3.5	Procesamiento de datos obtenidos	45
3.5.1	Procesamiento de los registros del Data Logger GPS	45
3.5.2	Procesamiento de los registros del Scanner Autel MaxiCheck MX 808	45
3.5.3	Procesamiento de los registros del Analizador de Energía AEMC 8335	46
3.6	Análisis de los factores que intervienen en la eficiencia energética del VE	47
3.6.1	Tecnología y Factores del vehículo	48
3.6.1.1	Estado de carga de la batería (SOC)	49
3.6.1.2	Resistencia aerodinámica	50
3.6.2	Factores ambientales naturales	50
3.6.2.1	Gradiente de carretera	51
3.6.2.2	Temperatura ambiente	52
3.6.3	Factores de conducción	53
3.6.4	Factores del entorno artificial	53
3.7	Estimación de la eficiencia del Renault Twizy	53
3.7.1	Eficiencia de carga/descarga de la batería	54
3.7.1.1	Eficiencias en base a cantidad de energía	56
3.7.2	Eficiencia del inversor y motor eléctrico	57
3.7.3	Potencia de tracción	59
3.7.4	Energía de regeneración	60
3.8	Evaluación de la eficiencia del VE con distintos coeficientes de rodadura	60
	CAPÍTULO IV	62
	4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1	Descripción de la ruta de ensayo	62
4.1.1	Ruta completa	62
4.1.1.1	Trayectoria de la ruta	62
4.1.1.2	Características cinemáticas y de altitud	64
4.1.2	Sección urbana	66
4.1.2.1	Trayectoria de la ruta	66
4.1.2.2	Características cinemáticas y de altitud	67
4.1.3	Sección rural	69
4.1.3.1	Trayectoria de la ruta	69

4.1.3.2 Características cinemáticas y de altitud	70
4.1.4 Sección autopista	71
4.1.4.1 Trayectoria de la ruta	71
4.1.4.2 Características cinemáticas y de altitud	72
4.2 Eficiencia del vehículo: ruta completa	74
4.2.1 Estimación de energía consumida: tanque a la rueda	74
4.2.2 Eficiencia del vehículo y componentes	74
4.3 Eficiencia del vehículo: sección urbana	77
4.3.1 Estimación de energía consumida: tanque a la rueda	77
4.3.2 Análisis de energía consumida: componentes vs factores	77
4.3.2.1 Batería e inversor vs velocidad	77
4.3.2.2 Batería vs corriente de descarga	78
4.3.2.3 SOCv vs altura	79
4.3.2.4 Elementos del tren motriz vs temperatura de motor eléctrico	80
4.3.2.5 Energía de tracción vs energía de frenado	81
4.3.2.6 Potencias instantáneas de los elementos del tren motriz	81
4.3.3 Eficiencia del vehículo y componentes	82
4.4 Eficiencia del vehículo: sección rural	84
4.4.1 Estimación de energía consumida: tanque a la rueda	84
4.4.2 Análisis de energía consumida: componentes vs factores	84
4.4.2.1 Batería vs velocidad	84
4.4.2.2 Batería vs corriente de descarga	86
4.4.2.3 Batería vs régimen de motor eléctrico	86
4.4.2.4 SOCv vs altura	87
4.4.2.5 Elementos del tren motriz vs temperatura de motor eléctrico	88
4.4.3 Eficiencia del vehículo y componentes	88
4.5 Eficiencia del vehículo: sección autopista	90
4.5.1 Estimación de energía consumida: tanque a la rueda	90
4.5.2 Análisis de energía consumida: componentes vs factores	90
4.5.2.1 Batería vs velocidad	90
4.5.2.2 Batería vs corriente de descarga	91

4.5.2.3 SOCv vs altura	92
4.5.2.4 Elementos del tren motriz vs temperatura de motor eléctrico	92
4.5.3 Eficiencia del vehículo y componentes	93
4.6 Comparación de resultados entre secciones de ruta	95
4.6.1 Parámetros cinemáticos	95
4.6.2 Energía consumida: tanque a la rueda	96
4.6.3 Análisis del comportamiento de tensión de batería	98
4.6.4 Analisis de la eficiencia de descarga de batería vs factores	99
4.6.5 Eficiencia del vehículo y componentes	101
4.7 Eficiencia del vehículo para distintos coeficientes de rodadura	102
CAPÍTULO V	104
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
5.1 Conclusiones	104
5.2 Recomendaciones	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Diagrama básico de un vehículo eléctrico con batería.	8
2.2	Elementos del tren motriz del Renault Twizy	10
2.3	Partes de una batería	11
2.4	Motor eléctrico, inversor y reductor del Renault Twizy	17
2.5	Diagrama eléctrico de un inversor trifásico	18
2.6	Señales de voltaje del inversor hacia el motor eléctrico	18
2.7	a) Aspecto exterior de una máquina asíncrona trifásica; b) vista de la sección interior	20
2.8	Motor de corriente alterna (CA) síncrono	21
2.9	Clasificación de los factores que inciden en el consumo y la generación de energía de frenado	22
2.10	Rendimientos orientativos de los caminos energéticos para diferentes trenes de propulsión	24
2.11	Diagrama de fuerzas para un vehículo rodante	25
3.1	Diagrama de flujo del proceso de análisis de la eficiencia de un VE	31
3.2	Metodología para el cálculo de la eficiencia en un VE	32
3.3	Renault Twizy	35
3.4	GPS Data logger Columbus	36
3.5	Modos de funcionamiento del GPS data logger Columbus	37
3.6	Escáner automotriz Autel Maxicheck MX808	38
3.7	Registrador trifásico de calidad eléctrica AEMC 8335	38
3.8	Instalación de GPS en el vehículo	41
3.9	Conexión del equipo hacia la red trifásica en delta	44
3.10	Procesamiento de datos obtenidos con el GPS datalogger	45
3.11	Procesamiento de datos obtenidos con el scanner automotriz	46
3.12	Procesamiento de datos obtenidos con el analizador de energía AEMC 8335	47
3.13	Diagrama de los factores que influyen en el consumo de VE	48
3.14	Rango ideal de trabajo de una batería de ión-litio en función del SOC	50
3.15	Gradiente de carretera (α), variación de altura (Δh), longitud (d) y distancia del recorrido (l)	51
3.16	Curva de autonomía en función de la temperatura	52
3.17	Circuito equivalente de la batería	55
3.18	Gráfica V_0 vs SOC	56
3.19	Mapa de eficiencias del ME del Renault Twizy	59
4.1	Ruta completa de ensayo	63
4.2	Ciclo de conducción de ruta de ensayo	65
4.3	Sección urbana	66

4.4	Ciclo de conducción sección urbana	68
4.5	Sección rural	69
4.6	Ciclo de conducción sección rural	71
4.7	Sección autopista	71
4.8	Ciclo de conducción sección autopista	73
4.9	Energía consumida del tanque a la rueda en ruta completa	74
4.10	Energía consumida del tanque a la rueda en sección urbana	77
4.11	Consumo de batería de tracción e inversor trifásico vs velocidad	78
4.12	Consumo batería vs corriente de descarga	79
4.13	SOCv vs altura	80
4.14	Consumo de los elementos del VE vs temperatura ME	80
4.15	Energía de tracción vs energía de frenado vs energía de regeneración	81
4.16	Potencias instantáneas de los elementos del tren motriz	82
4.17	Energía consumida del tanque a la rueda en sección rural	84
4.18	Consumo de batería vs velocidad (aceleración)	85
4.19	Consumo de batería vs velocidad (desaceleración)	85
4.20	Consumo de batería vs corriente de descarga	86
4.21	Consumo de batería vs régimen motor eléctrico	87
4.22	SOCv vs altura	87
4.23	Consumo de los elementos del tren motriz del VE vs temperatura del ME	88
4.24	Energía consumida del tanque a la rueda en sección de autopista	90
4.25	Consumo de batería vs velocidad	91
4.26	Consumo de batería vs corriente de descarga	91
4.27	SOCv vs altura	92
4.28	Consumo de elementos del tren motriz del VE vs temperatura ME	93
4.29	Características generales de las secciones de ruta	95
4.30	Comparación de energía consumida del tanque a la rueda entre secciones de ruta	96
4.31	Consumo real de la batería para cada sección de ruta	97
4.32	Comportamiento de tensión de la batería de tracción	98
4.33	Eficiencia de descarga de batería vs factores	99
4.34	Influencia del SOCv en la eficiencia de descarga de batería del Renault Twizy	101

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Comparación de los distintos vehículos eléctricos	9
2.2	Características de las baterías de ion-Litio	12
2.3	Factores que influyen en el SOH de una batería	15
2.4	Comparación de los parámetros de las distintas baterías	16
2.5	Rendimientos que llevan la energía del pozo al tanque del vehículo	24
2.6	Eficiencia de la conversión de energía a bordo en trabajo útil.	25
2.7	Coefficientes de resistencia comunes de neumáticos	27
2.8	Constantes de presión, temperatura y densidad	28
3.1	Requerimientos para la generación de rutas de ensayo	34
3.2	Datos técnicos del Renault Twizy 80	35
3.3	Parámetros del archivo CONFIG.txt para el GPS data logger	40
3.4	Formato de los datos obtenidos por el GPS data logger P-1	40
3.5	Datos disponibles del Renault Twizy en scanner Autel MaxiCheck MX808	42
3.6	Datos de mayor relevancia del scanner Autel MaxiCheck MX808	43
3.7	Valores principales del analizador de energía AEMC 8335	44
3.8	Valores típicos de coeficiente de rodadura en función del tipo de calzada	61
4.1	Trayecto ruta de ensayo	64
4.2	Características ruta completa	64
4.3	Trayecto sección urbana	67
4.4	Características sección urbana	68
4.5	Trayecto sección rural	70
4.6	Características sección rural	70
4.7	Trayecto sección autopista	72
4.8	Características sección autopista	73
4.9	Estado de Salud (SOH) del banco de baterías	75
4.10	Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en ruta completa	76
4.11	Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en sección urbana	83
4.12	Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en sección rural	89
4.13	Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en sección de autopista	94

4.14	Eficiencias para cada elemento del tren motriz para cada sección de ruta	102
4.15	Eficiencias calculadas con diferentes coeficientes de rodadura	103

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Esfuerzo de tracción total	26
2.2	Resistencia a la rodadura	26
2.3	Resistencia aerodinámica	27
2.4	Temperatura en función de la altura	28
2.5	Presión en función de la altura	28
2.6	Densidad del aire en función de la altura	28
2.7	Resistencia a pendientes	28
2.8	Fuerza de la aceleración lineal	29
2.9	Fuerza de la aceleración angular	29
2.10	Potencia de tracción	29
2.11	Energía consumida en la rueda	30
2.12	Potencia motor eléctrico	30
2.13	Potencia de salida de batería de tracción	30
3.1	SOC en función del voltaje	49
3.2	Gradiente de la carretera	51
3.3	Distancia para el cálculo de gradiente de carretera	52
3.4	Eficiencia del vehículo eléctrico	54
3.5	Eficiencia de descarga de la batería	54
3.6	Eficiencia de carga de la batería	54
3.7	Tensión en bornes de batería según circuito equivalente	55
3.8	Potencia de descarga de batería	57
3.9	Energía de batería en un instante dado	57
3.10	Eficiencia del inversor	58
3.11	Fuerza de tracción para un ciclo de conducción	59
3.12	Factor de masa equivalente	59
3.13	Energía de frenado	60

RESUMEN

El presente trabajo tiene el objetivo de analizar la eficiencia del vehículo eléctrico Renault Twizy mediante pruebas realizadas en una ruta de estudio real. Para esto, se desarrolló un proceso general, que contempla la selección de la ruta de ensayo, de equipos y de ecuaciones para el cálculo, y una metodología específica, que detalla la forma en que se tomaron los datos del vehículo para establecer los valores de eficiencia. En esta metodología se analizó el flujo de energía en dos direcciones: (i) de la batería de tracción al motor eléctrico (basándose en parámetros eléctricos), para lo cual, se utilizaron un escáner automotriz Autel MaxiCheck 808 y un analizador de energía AEMC 8335, y (ii) de la carretera al motor eléctrico (en función de variables cinemáticas) mediante el uso de un GPS datalogger además de las ecuaciones de dinámica automotriz. Cabe recalcar que todos los datos fueron registrados con una frecuencia de 1 Hz y se los tabuló de forma ordenada en un documento Excel. De esta manera, se calcularon potencias instantáneas para cada elemento del tren motriz y se estimó su consumo acumulado. Por consiguiente, los consumos de salida y de entrada de cada elemento fueron considerados para calcular las eficiencias en toda la ruta y en cada una de sus secciones. Como consecuencia, la eficiencia general del vehículo eléctrico fue: para la sección urbana del 82%, con un consumo real de 1 760,54 Wh, para la sección rural del 85% con un consumo de 1 590,07 Wh y para la sección de autopista del 87% con un consumo de 1 543,85 Wh. Para la totalidad del trayecto, se obtuvo un consumo real de 4 894,46 Wh y una eficiencia del 85%. Además, se evidenció un aumento del 38,11% en el consumo obtenido en el presente estudio con respecto al indicado por el fabricante para una ruta urbana. Finalmente, se determinó que el porcentaje de energía regenerada supera el 11% en todas las secciones de ruta, obteniéndose un valor máximo de 18% para la sección rural.

ABSTRACT

The present work has the objective of analyzing the efficiency of the electric vehicle Renault Twizy through tests carried out on a real study route. For this, a general process was developed, which contemplates the selection of the test route, equipment and equations for the calculation, and a specific methodology, which details the way in which the vehicle data was taken to establish the values of efficiency. In this methodology, the energy flow was analyzed in two directions: (i) from the traction battery to the electric motor (based on electrical parameters), for which an Autel MaxiCheck 808 automotive scanner and an AEMC 8335 energy analyzer were used, and (ii) from the road to the electric motor (depending on kinematic variables) by using a GPS datalogger in addition to the automotive dynamic equations. It should be noted that all the data were recorded at a frequency of 1 Hz and tabulated in an orderly manner in an Excel document. In this way, instantaneous powers were calculated for each element of the power train and their accumulated consumption was estimated. Therefore, the output and input consumption of each element were considered to calculate the efficiencies in the entire route and in each of its sections. As a consequence, the general efficiency of the electric vehicle was for the urban section of 82%, with a real consumption of 1 760.54 Wh, for the rural section of 85% with a consumption of 1 590.07 Wh and for the highway section of 87% with a consumption of 1 543.85 Wh. For the entire journey, a real consumption of 4 894.46 Wh and an efficiency of 85% were obtained. In addition, there was evidence of a 38.11% increase in the consumption obtained in the present study with respect to that indicated by the manufacturer for an urban route. Finally, it was determined that the percentage of regenerated energy exceeds 11% in all road sections, obtaining a maximum value of 18% for the rural section.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar la eficiencia energética de un vehículo eléctrico, a través de la recopilación de parámetros eléctricos y cinemáticos obtenidos mediante pruebas experimentales en condiciones de tráfico real y establecer valores de eficiencias de cada elemento del tren motriz, así como también, eficiencias globales desde el tanque a la rueda del vehículo, en base a las características geográficas y de tránsito vehicular de la ciudad de Ibarra.

En el Ecuador, los vehículos eléctricos tienen un bajo impacto en el sector del transporte de acuerdo con investigaciones previas. Esto se debe principalmente a que estos vehículos poseen un elevado precio y, durante una conducción real, una autonomía muy limitada a pesar de presentar altos porcentajes de eficiencia energética. En este contexto, el presente trabajo pretende aportar con conocimiento científico relacionado con la eficiencia de vehículos eléctricos y los parámetros que influyen en su variación.

En el Capítulo I, se detallan datos históricos relacionados con el desarrollo de los vehículos eléctricos, así como también, se plantea la problemática concerniente al presente tema de investigación. Además, se establece el objetivo general del trabajo, su alcance y su justificación. En el Capítulo II se realiza una revisión bibliográfica sobre la arquitectura de los vehículos eléctricos, considerando las características de cada elemento del tren motriz. Además, se describe el concepto de eficiencia energética y sus diferentes etapas, y se finaliza el capítulo con información relacionada a la dinámica del vehículo.

En el Capítulo III, se presenta el marco metodológico para la obtención de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de la eficiencia energética de vehículos eléctricos. Asimismo, se muestran los diferentes equipos utilizados, los parámetros que influyen en la eficiencia y las ecuaciones empleadas para su estimación. En el Capítulo IV, se muestran las secciones de ruta de estudio con sus características cinemáticas, el análisis de la eficiencia energética considerando los consumos de cada elemento del tren motriz y la eficiencia del vehículo para distintos coeficientes de rodadura.

En el capítulo final, se exponen los resultados del análisis de la eficiencia energética del vehículo eléctrico Renault Twizy por medio de conclusiones y recomendaciones concretas.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El cambio climático producido por el calentamiento global afecta de manera inevitable el bienestar de las personas en todo el mundo. Gran parte de la contaminación que genera este cambio es emitida por la industria automotriz. Concretamente, el 16% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, es causado por vehículos con motor de combustión interna (MCI). En consecuencia, este tipo de automotores representan un gran problema si se pretende reducir el índice de emisiones contaminantes (Fernández, 2021).

En los próximos años, se prevee que los vehículos con MCI sean reemplazados por vehículos eléctricos (VE), lo que generará en el sector del transporte, un incremento en la demanda de electricidad. Dentro de este enfoque, se está optando por cambiar el uso de combustibles fósiles por energías renovables como la energía hidráulica, solar o eólica para la generación de electricidad (Shafique et al., 2022).

No obstante, la tecnología de los vehículos eléctricos no es nueva y se ha estado desarrollando conjuntamente con los motores de combustión interna. En el año 1881, se empezaron a fabricar los primeros VE independientes. Alrededor del año 1960, se evidenciaron las problemáticas relacionadas con la contaminación ambiental, por lo que, se incrementó la fabricación de los VE. La crisis del petróleo de 1973, también fomentó el desarrollo de este tipo de vehículos principalmente para instituciones gubernamentales. A pesar de esto, los vehículos con MCI continuaron su evolución y se desarrollaron tecnologías que aún se conservan en los modelos actuales. Un ejemplo claro es el sistema de inyección directa de combustible. De la misma forma, los VE continuaron con su desarrollo, motivado principalmente por campañas en contra de la contaminación, cuya última ola de popularidad se originó en el año de 1990 y se mantiene hasta la actualidad (Putnieks, 2012).

Durante el año 2019, grandes marcas reconocidas en el sector automotriz como Volvo, empezaron a priorizar la producción de ejemplares netamente eléctricos. Además, Jaguar Land

Rover también fue partícipe de este gran cambio en el año 2020. Por otra parte, Volkswagen se ha comprometido en ser el líder mundial en la producción y venta de VE para el año 2025. Otro acontecimiento importante es el caso de Noruega, que prohibirá la venta de automoviles impulsados por combustibles fósiles desde el año 2025, medida que también pretende ser adoptada por Alemania en sus empresas como Volkswagen, Mercedes-Benz y Porsche (NaGeo, 2017).

1.2 SITUACIÓN ACTUAL

Los combustibles alternativos y la electrificación aumentaron en gran medida, principalmente en países de primer mundo. Tanto la gasolina como el diésel son recursos que siguen vigentes en varios países cuya infraestructura es muy limitada para nuevas tecnologías. Además, se debe considerar que los combustibles tradicionales tienen ventajas como: considerable abundancia y distribución en el mundo, densidad de alta energía e idóneo funcionamiento a diferentes temperaturas. Además, dentro de la investigación representan un continuo avance en tecnologías nuevas para el control de emisiones y, por consiguiente, beneficios económicos (Motor trend, 2008).

Los VE ya son una realidad en Europa, aunque no de manera generalizada. La Unión Europea se ha planteado recientemente la idea de reducir las emisiones de dióxido de carbono actuales de 95 gramos de CO₂ por kilómetro en un 55%, teniendo como plazo hasta el año 2030. De esta manera se aprobaron varias propuestas legislativas que se conocen con el nombre de Fit for 55. En éstas se incluye la prohibición de la venta de vehículos con MCI e híbridos a partir del año 2035 (Diario As, 2021). Es así como la tendencia actual se enfoca en incrementar la demanda de vehículos eléctricos, no solo por el hecho de reducir las emisiones contaminantes, sino también porque se trata de una opción mucho más eficiente desde el punto de vista energético.

Por otra parte, en Ecuador las normativas vigentes que regulan las emisiones se encuentran prácticamente obsoletas en comparación con las normativas europeas como la Euro VI. En pruebas estáticas de la Revisión Técnica Vehicular para coches posteriores al año 2000, se permiten hasta 200 partículas por millón (ppm) de hidrocarburos (HC) en la gasolina, en contraste con emisiones menores a 10 ppm que se permiten en la normativa Euro VI (INEN,

2017). Con este dato se puede evidenciar la gran diferencia que existe entre Ecuador y varios países considerados como primer mundo. En Ecuador no existen decretos que fomenten el uso de VE, ni tampoco la infraestructura necesaria que permita una transición de motores de combustión a una electrificación total. Además, las altas eficiencias que presentan los VE pueden verse alteradas por variables como la altura sobre el nivel del mar, la pendiente, la temperatura, el tipo de ruta, entre otras. Por esta razón es importante realizar estudios que comprueben si existe variaciones en la eficiencia energética de vehículos eléctricos en un contexto de conducción real.

Además, las emisiones del VE dependen de la fuente primaria de energía eléctrica. En varios países se siguen utilizando combustibles fósiles para la generación de energía en lugar del uso de energías renovables. Cuando las fuentes primarias de energía para la fabricación de un VE son combustibles como el carbono o el gas natural, sus emisiones de CO₂ suelen ser de aproximadamente un tercio de las que un vehículo con MCI emitiría. Esto implica que los VE contaminan a pesar de que en el ciclo de su funcionamiento no produzcan ninguna emisión (Roás, 2011).

1.3 PROSPECTIVA

Un índice elevado en cuanto a la demanda de VE se dio en el año 2015, alcanzando un estimado de 1 millón de vehículos a nivel global, valor que para el año 2018 se habría triplicado, siendo China el líder con una cifra de 1.2 millones de VE, seguido de Estados Unidos con 700 mil y, finalmente, Japón con 200 mil. Para el año 2020 China se habría propuesto alcanzar la meta de 5 millones de vehículos eléctricos; mientras que, Estados Unidos se ha fijado para el año 2050 llegar a una cuota dentro del mercado equivalente al 50%. Por otra parte, distintos países como es el caso de Eslovenia se han propuesto para el año 2030 vender únicamente vehículos eléctricos (Lopez et al., 2021).

Para Ecuador, se estima que en los próximos años el mercado de VE tendrá una mayor acogida. Esto se debe a los continuos esfuerzos por modificar la matriz energética, en la que se pretende realizar un cambio radical sobre el uso de combustibles fósiles para ser reemplazados por energías renovables. De esta forma se puede aprovechar el hecho de que Ecuador posee una

tarifa eléctrica baja en relación con otros países, además de propuestas de creación de puntos de conexión, entre otros. La proyección a futuro es que la eficiencia energética de todo el sector automotriz se vea incrementada en el entorno local. De igual modo, si la eficiencia que brindan los VE se encuentra en estado de mejora continua, es importante determinar el nivel que otorgan vehículos que ya se encuentran actualmente circulando.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Ecuador, los vehículos eléctricos no son una prioridad debido a factores como el costo, la baja autonomía, la falta de centros de mantenimiento, los riesgos eléctricos, etc. Además, quienes adquieren estos vehículos solo disponen de datos técnicos proporcionados por el fabricante, cuyas especificaciones suelen brindar datos que, llevados a una ruta de conducción real, pueden variar significativamente. Dentro de estos datos, se encuentra el rendimiento energético del vehículo que cambiará en base a distintos parámetros, como por ejemplo el modo de conducción, la inclinación del suelo, la velocidad del vehículo o incluso el estado de carga de la batería (SOC). Por este motivo, el problema nace como consecuencia de la falta de conocimiento relacionado a varios aspectos del funcionamiento básico de un vehículo eléctrico, como su recorrido, su potencia o incluso la capacidad que deben tener los centros de recarga. Dentro de este enfoque, no se han observado un gran número de investigaciones que analicen a profundidad el comportamiento y la eficiencia de los VE en la ciudad de Ibarra, lo que produce un considerable desconocimiento respecto a este tipo de tecnología, y esto conlleva a que los compradores prefieran adquirir vehículos con MCI.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la eficiencia energética del vehículo eléctrico Renault Twizy a través de pruebas de ruta.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir una metodología para analizar la eficiencia de un vehículo eléctrico en condiciones de tráfico real.

2. Estimar la eficiencia total del vehículo, y también la eficiencia para diferentes tramos del tren de potencia.
3. Analizar la variación del rendimiento del vehículo en función del tipo de ruta y de calzada, así como también la eficiencia de descarga de la batería para diferentes estados de carga.

1.6 ALCANCE

El presente trabajo de investigación se lo realizará en el vehículo eléctrico Renault Twizy. Las secciones de ruta (rural, autopista y urbana) que se tomarán en cuenta para la generación de datos ya han sido desarrolladas previamente para el mismo vehículo en la ciudad de Ibarra. Por este motivo, no es necesario volver a generar una nueva ruta.

Una vez seleccionada la ruta de estudio, se llevarán a cabo las pruebas para la recopilación de datos, a través de un GPS data logger, un escáner automotriz y un analizador de energía para posteriormente, representarlos y analizarlos. El equipo GPS data logger se encargará de medir variables cinemáticas del vehículo como velocidad, distancia entre puntos del recorrido, posición en el mapa, pendiente, entre otros. El escáner automotriz tomará varios datos del tren de potencia, principalmente voltajes y amperajes de funcionamiento de la batería de tracción. Finalmente, el equipo analizador de energía medirá variables eléctricas como voltaje y amperaje (potencia) a la salida del inversor trifásico. De esta forma se calculará la eficiencia partiendo de los distintos tramos del tren de potencia del vehículo eléctrico hasta determinar su rendimiento general durante la ruta real.

1.7 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo referente al análisis de rendimiento del vehículo eléctrico Renault Twizy, pretende determinar la eficiencia del vehículo en distintos puntos del tren de potencia eléctrico. Como consecuencia, se evaluará la variación entre los datos que brinda el fabricante y los que se obtengan, mediante pruebas realizadas en una ruta real. La importancia de este estudio radica en determinar la eficiencia real del vehículo eléctrico Renault Twizy en términos de potencia y autonomía en diferentes modos de operación. De esta forma, no solo se conocerá mejor el

desempeño de un VE en las calles del Ecuador, sino que también, la presente investigación puede servir como información para un posible desarrollo de centros de carga para los VE.

Por otra parte, esta investigación se halla en relación con el Plan Nacional para el Buen Vivir 2017-2021, con referencia al Objetivo 3 de “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones” y al objetivo 5 de “Impulsar la Productividad y Competitividad para el crecimiento económico sustentable de manera redistributiva y solidaria” (Consejo Nacional de Planificación, 2017).

El aumento de la electrificación es evidente en todo el sector automotriz. Por este motivo, se requieren estudios similares para conocer el comportamiento de los VE que en un futuro aumentarán su demanda dentro del país. Es necesario considerar el mayor número de variables posibles para obtener resultados cercanos a la realidad. En el caso del Renault Twizy, al ser un auto pequeño, se puede comprobar si es capaz de rendir de forma similar a un vehículo a gasolina para establecer ventajas y desventajas de su uso.

1.8 CONTEXTO

Los VE no se caracterizan por recorrer grandes distancias, a diferencia de los vehículos con motor de combustión interna. En la actualidad, el VE posee una autonomía relativamente baja, teniendo un consumo de 14kWh o lo que es igual a 100km de recorrido aproximadamente (Energía y Sociedad, 2018).

Sin embargo, la electrificación no se detiene y pretende sustituir a vehículos con MCI cuya eficiencia energética es muy baja. Por este motivo, La ley Orgánica de Eficiencia Energética (LOEE) en su nuevo reglamento vigente desde octubre del 2021 enuncia que: “A partir del año 2025 todos los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e interparroquial en el Ecuador continental, deberán ser únicamente de medio motriz eléctrico. En el caso de la región Insular, esta medida será evaluada por el Comité Nacional de Eficiencia Energética (CNEE)” (Guglielmetti, 2021).

Por otra parte, el mercado ecuatoriano evidenció un crecimiento de 2,7% en cuanto a la venta de nuevos modelos durante el año 2020, contando con 94 marcas y 460 modelos, mismos que,

tuvieron precios mayormente accesibles para los compradores, registrando un total de ventas de 85.818 vehículos de distintos segmentos y tecnologías (AEADE, 2020). Además, en los últimos tres años la demanda de vehículos eléctricos alcanzó una cifra de 356 unidades (El Universo, 2020).

En el contexto nacional, el autor Merchan Lima (2017) realizó un estudio relacionado con la eficiencia energética de un vehículo eléctrico mediante pruebas de ruta en la ciudad de Cuenca. Los resultados de dicha investigación servirán de comparación y de referencia para el presente trabajo.

A nivel local (ciudad de Ibarra), no se han encontrado estudios sobre “la eficiencia de un vehículo eléctrico” que generen una contribución al desarrollo tecnológico del entorno.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

La definición de vehículo eléctrico es sencilla y se visualiza en la Figura 2.1. Posee una batería eléctrica en donde se almacena la energía, un motor eléctrico y un controlador (Larminie & Lowry, 2003). Por lo general, la batería es recargada a través de la red eléctrica mediante un enchufe. El controlador regula la potencia que se suministra al motor y, por consiguiente, la velocidad del vehículo.

Un vehículo eléctrico con baterías (VEB), brinda diversas ventajas que se mencionan a continuación:

- ✓ Menor complejidad en su estructura (baja cantidad de elementos móviles)
- ✓ El motor puede funcionar como generador, haciendo que, parte de la energía se recupere fácilmente.
- ✓ Tiene un rendimiento aproximado al 90%.
- ✓ Las baterías pueden ser cargadas con electricidad de los hogares.

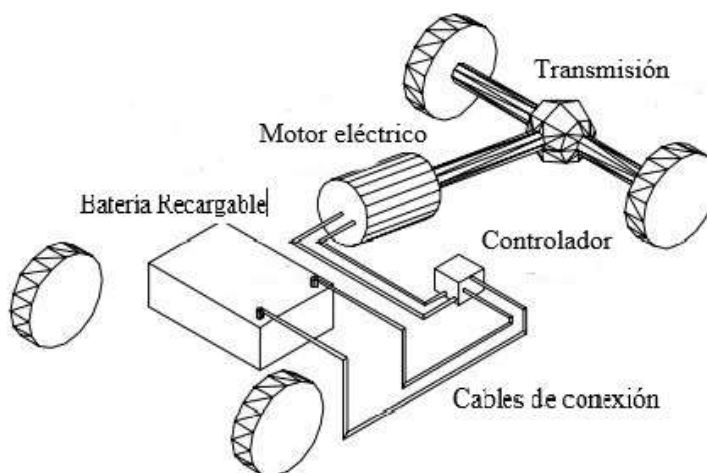


Figura 2.1 Diagrama básico de un vehículo eléctrico con batería

(Larminie & Lowry, 2003, pág. 8)

Los vehículos eléctricos están empezando a tener mayor relevancia en el Ecuador. Esto se debe principalmente a sus ventajas respecto a las emisiones contaminantes y de efecto invernadero que un vehículo con MCI genera. Un vehículo eléctrico de batería (VEB) no produce emisiones

durante la etapa de uso, pero sí durante la fase de fabricación. Sin embargo, los vehículos convencionales a combustión siguen siendo más atractivos por su alta autonomía, es decir que, no dependen de la recarga de una batería; pueden recorrer muchos kilómetros sin problemas y, además, las estaciones de servicio (gasolineras) abundan en cualquier lugar del país. Esto supone un problema para los VEB que, a pesar de sus cero emisiones, aún poseen ciertas limitaciones (Ding et al., 2017).

Existen varios tipos de vehículos eléctricos, los cuales se resumen en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Comparación de los distintos vehículos eléctricos

Tipos	PEV	HEV	FCEV
Sección de accionamiento	Máquina eléctrica	Máquina eléctrica, motor de combustión interna (MCI)	Máquina eléctrica
Fuentes de energía	Batería, ultra condensador	Batería, ultra condensador, MCI.	Pila de combustible
Suplementos energéticos	Electricidad y sistema de potencia	Electricidad y sistema de potencia, estación de gasolina	Hidrógeno

Fuente: (Ding et al., 2017)

Los PEV también son conocidos como VEB y, su capacidad de almacenamiento de energía depende específicamente de la tecnología implementada en su batería. Los vehículos eléctricos híbridos (HEV) son aquellos que poseen tanto un motor de combustión como un motor eléctrico. Este último puede ser usado como generador o como tracción adicional, dependiendo de la configuración del tren motriz. Por su parte, los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) son similares a los vehículos eléctricos de batería, solo que la energía no se almacena en baterías acumuladoras, sino que se usa una pila de combustible, es decir, una central energética portátil, donde la producción de energía se origina a partir del procesamiento de hidrógeno y, esta a su vez, es destinada a una batería.

2.2 TREN DE POTENCIA DE UN VEB

Los sistemas de propulsión de los VEB, pueden clasificarse dependiendo de qué rueda está siendo impulsada por el motor, es decir, ruedas delanteras o posteriores propulsadas ya sea por un solo motor o por dos, y, a su vez, cuatro ruedas impulsadas por motores independientes en cada una de ellas (Nguyen et al., 2022).

Por lo general, el tren motriz de los VEB, están compuestos por los siguientes elementos: Cargador, batería de tracción, inversor, motor eléctrico trifásico, reductor y ruedas.



Figura 2.2 Elementos del tren motriz del Renault Twizy

(Torres Macció, 2018)

2.2.1 CARGADOR

El cargador es un elemento que transforma la corriente alterna de 220 V de una fuente externa a una corriente continua con un voltaje de 60 V; en el caso del Twizy, con el objetivo de recargar su batería. El tiempo estimado de carga para este vehículo, con una fuente convencional de 220 V y 10 A, es de tres horas y media.

2.2.2 BATERÍA DE TRACCIÓN

Las baterías almacenan y convierten la energía electroquímica presente en sus celdas en energía eléctrica que será aprovechada por la electrónica de potencia para dar tracción (Goodarzi, Gordon A. Hayes, 2018). Las baterías que mayormente se utilizan para aplicaciones de trenes motrices eléctricos son las llamadas baterías secundarias. Este tipo de baterías se pueden cargar y descargar de manera repetida. Algunos ejemplos son: baterías plomo-ácido (PbA), níquel-metal hidruro (NiMH) e iones de litio (LI-ion).

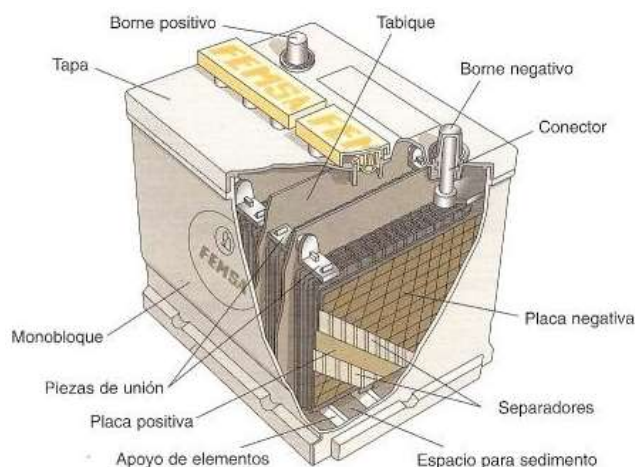


Figura 2.3 Partes de una batería

(Calsina Fleta, 2011, pág. 261)

En la figura 2.3 se muestran los elementos de una batería. Por lo general, esta es la estructura de la mayoría y, en ellas, se puede denotar un número específico de celdas electroquímicas que se conectan entre sí, ya sea en serie o paralelo, logrando con esto los distintos parámetros requeridos en aplicaciones determinadas de corriente y tensión.

Cada celda electroquímica consta de un cátodo (electrodo positivo), ánodo (electrodo negativo) y electrolitos, mismos que, dan paso al movimiento de iones entre los electrodos, logrando el flujo de corriente fuera de la batería para cumplir con su función y alimentar un circuito eléctrico.

2.2.2.1 Tipos de baterías para VE

- **Batería de plomo-ácido**

Sus elementos electroquímicos están formados por una placa ánodo hecha de plomo, una placa cátodo cubierta con plomo dióxido de carbono (PbO_2) y un electrolito formado por agua y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Al producirse las reacciones, generan un voltaje aproximado de 2 V. Si no se carga, pueden formarse cristales de sulfato de plomo generando daños irreversibles en la batería.

- **Batería de Níquel – Metal – Hidruro (NiMH)**

Antiguamente era común el uso de la batería de níquel-cadmio, pero presentaba riesgos, debido a que, el cadmio es tóxico y cancerígeno, además de tener un elevado costo. Por esta razón, fue sustituida por la batería de NiMH. Su estructura se compone por aleación de hidruro metálico (ánodo) y níquel (cátodo). EL voltaje de celda es de 1,2 V aproximadamente. Posee una elevada autodescarga y puede sufrir de “efecto memoria” (pérdida de capacidad debido a múltiples cargas parciales).

- **Batería de ion-Litio**

Las celdas de iones de litio tienen un cátodo formado a partir de óxido de metal de litio y un ánodo de carbono en forma de grafito de carbono (Goodarzi, Gordon A. Hayes, 2018, pág. 76). Este tipo de baterías presentan un reducido efecto memoria, pero pierden su capacidad con el transcurso de su ciclo de vida. El litio que se encuentra dentro de la batería se reduce con el tiempo. Al disponer de voltajes de celda más elevados puede generar una pérdida de capacidad más prematura.

Las baterías de iones de litio en comparación con las de NiMH presentan diversas ventajas tales como: sus componentes son reciclables; el costo de las celdas en la actualidad es más bajo; presentan una baja auto descarga y poseen un buen rendimiento de temperatura (Husain, 2021).

Las características principales de este tipo de baterías se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Características de las baterías de ion-Litio

Energía específica	70 – 200 Wh/kg
Potencia específica	300 -1500 W/kg
Tensión nominal de celda	3,5 V
Rendimiento	~90%
Auto-descarga	Muy baja, 1% al mes
Número de ciclos	3000
Tiempo de recarga	2-3 h
Temperatura de funcionamiento	Ambiente

Fuente: (López Martínez, 2016, pág.38)

2.2.2.2 Parámetros y comparaciones de la batería

Existen diversos parámetros al momento de seleccionar una batería para aplicaciones en el campo automotriz. Por ejemplo, las baterías más usadas en vehículos híbridos suelen brindar menores prestaciones en almacenamiento de energía en comparación a las usadas en vehículos netamente eléctricos, donde se puede apreciar un elevado almacenamiento y rango operativo.

- **Tensión nominal**

Es el valor promedio de voltaje que presenta cada celda que compone una batería. Este valor depende directamente de la química empleada en el acumulador y tendrá variaciones, decreciendo cuando se emita una corriente e incrementando cuando se cargue la batería.

- **Energía específica**

Se define como la unidad de medida de la energía almacenada de una batería por unidad de peso, donde Li-ion posee la mayor densidad de energía como se muestra en la Tabla 2.3, siendo esta de 3 a 5 veces la de la batería de Pb-Ácido aproximadamente.

- **Ciclo de vida**

Se refiere a la cantidad de veces que una batería puede cargarse y descargarse antes de que llegue al final de su vida. Por lo general, el desgaste de las baterías electroquímicas se produce por factores como: tiempo, uso y temperatura.

- **Potencia específica**

Es una medida de la potencia de descarga disponible de un paquete de baterías por unidad de peso. Por lo general, la batería de plomo-ácido posee una alta potencia específica. Por otra parte, las baterías más nuevas como las de iones de litio y NiMH poseen potencias específicas comparables.

- **Autodescarga**

Existe un consumo de energía en las celdas electroquímicas inclusive si las baterías no están en uso constante. Este consumo, considerado como “parásito” de la energía que se encuentra almacenada, se denomina autodescarga.

- **Estado de carga (SOC)**

Es una medida de la energía restante de una batería en relación con la energía inicial o nominal. Es decir, brinda información al conductor del VE relacionada al tiempo de funcionamiento antes de que la batería necesite ser recargada. Esta medida es considerada como “capacidad a corto plazo” de una batería. Sin embargo, el porcentaje de carga mostrado en el tablero es solo un indicador de esta característica (Denton, 2020).

De acuerdo con los autores Pérez Valderrama & Walteros Parra (2016), medir el SOC de una batería es una tarea complicada debido a factores como la edad de la batería, el voltaje de carga, la temperatura, la velocidad de descarga y el manejo inadecuado que afectan la medición. El diseño de un proceso para la medición de estado de carga es muy complejo, por lo que, se suele optar por su estimación.

De forma general, el SOC de una batería puede definirse como su capacidad actual dividida para su capacidad nominal. Esta última, viene dada por el manual del fabricante y representa la cantidad máxima de energía que la batería puede almacenar (Wei et al., 2022).

- **Estado de salud (SOH)**

El estado de salud de una celda mide la pérdida de prestaciones producidas por el transcurrir del tiempo. Este cambio se debe al incremento de la resistencia interna o a la disminución de la capacidad de la batería y se define como la relación entre la capacidad máxima que puede tener en el momento de la medición y la capacidad inicial. Algunos factores que alteran el estado de salud de una batería se observan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Factores que influyen en el SOH de una batería

Magnitud de intensidad de carga/descarga
Temperatura ambiental
Sobrecarga, sobredescarga
Método de control de la carga
Tipo de almacenamiento y duración

Fuente: (López Martínez, 2016, pág. 21)

- **Eficiencia de amperios (o carga)**

Idealmente, una batería debería poseer una eficiencia de 100%, pero en la realidad existen pérdidas de energía que dependen de la temperatura, del tipo de batería y del estado de carga. Cuando una batería tiene valores de SOC entre el 20% y 80%, la eficiencia es casi máxima. Asimismo, cuando la carga es igual o menor al 20%, el rendimiento de la batería se reduce considerablemente (Morente Fernández, 2015).

- **Eficiencia energética**

Este es un parámetro de suma importancia y de acuerdo con el autor Larminie & Lowry (2003) “se define como la relación entre la energía eléctrica suministrada por una batería y la cantidad de energía eléctrica necesaria para devolverla al estado previo a la descarga” (p. 29). Un argumento fuerte que favorece el uso de VE es su alta eficiencia energética que como consecuencia genera una reducción de las emisiones totales. Es necesario mencionar que la eficiencia de los VE va a variar significativamente en función del tipo de uso que se le dé a la batería. Si la batería se carga y se descarga rápidamente, la eficiencia energética disminuirá considerablemente.

2.2.2.3 Comparaciones de las distintas baterías

- Batería de plomo-ácido (Pb - Ácido)
- Batería de Níquel-Cadmio (Ni – Cd)
- Batería de Níquel - Metal – Hidruro (Ni – MH)
- Batería de Ión - Litio (Li - Ión)

- Batería de Polímero - Ión - Litio (Li – Po)

Tabla 2.4 Comparación de los parámetros de las distintas baterías

Tipo	Energía específica (Wh/kg)	Auto descarga (% por mes)	Voltaje de celda (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Efecto Memoria
Pb - Ácido	30-50	5	2V	200-300	8 - 16h	NO
Ni – Cd	48-80	NA	1,25V	1500	1h	SÍ
Ni – MH	60-120	>10	1,25V	500-800	2 - 4h	SÍ, pero menor
Li - Ión	110-160	<2	3,6V	400-700 (tres años de vida)	2h	SÍ
Li – Po	100-130	NA	3,6V	300-500 (tres años de vida)	1 – 1,5h	NO

Fuente: (Goodarzi, Gordon A. Hayes, 2018, pág. 79)

Por lo general, las baterías suelen ser el elemento más caro de los VE, debido a factores como mantenimientos o recambios. Las características más relevantes al momento de comparar baterías son: la energía específica, ciclos de carga/descarga y la potencia específica.

2.2.2.4 Consideraciones de vida útil de las baterías

En relación con muchos productos eléctricos y electrónicos, las baterías electroquímicas pueden tener una vida útil considerablemente corta, esto dependerá de su química. Los productos automotrices han sido diseñados para un uso de entre 10 a 12 años. El gran desafío de los fabricantes de baterías ha sido desarrollar baterías que brinden similares prestaciones a la del producto automotriz. A continuación, se menciona algunos términos útiles:

- **Tiempo y ciclos de carga/descarga**

Una de las características de las celdas electroquímicas es que la capacidad de almacenar carga se degrada con el tiempo. La Carga/descarga profunda de una manera constante resulta en una vida útil reducida.

- **Vida útil**

La vida útil de una batería se puede describir usando tiempo (años) o ciclos repetidos. Las baterías de los automóviles pueden contar con un parámetro añadido expresado como autonomía en millas o kilómetros.

- **Comienzo de la vida (BOL)**

Los parámetros del comienzo de la vida son generalmente los valores para capacidad y resistencia interna de la batería cuando se fabrica inicialmente.

- **Fin de vida (EOL)**

Los parámetros de fin de vida son los valores de los componentes críticos una vez que se degradan con el tiempo o el uso. Se puede considerar como criterio de fin de vida cuando la capacidad de almacenamiento de la batería descienda al 80% del valor BOL o que la resistencia interna aumente en un 50%.

2.2.3 INVERSOR

Es el dispositivo que se encarga de transformar la corriente continua, proveniente de la batería, en corriente alterna; sirve para alimentar al motor eléctrico trifásico.



Figura 2.4 Motor eléctrico, inversor y reductor del Renault Twizy

(Torres Macció, 2018, pág. 12)

Las baterías generan cierta tensión que, posteriormente, será aprovechada por el motor. Sin embargo, para que dicha energía sea empleada de tal forma que el motor pueda funcionar a un régimen deseado, debe ser transformada de acuerdo con la demanda mecánica requerida. El

motor eléctrico es capaz de convertir la energía de la batería en movimiento y, el movimiento giratorio en energía almacenable. En este último proceso, el motor es usado como generador (freno regenerativo), cuya energía resultante es almacenada en la batería del VE. Tanto el cambio del sentido del flujo energético como la transformación de AC a DC son producidos por el inversor y el transformador (Cuesta, 2017).

En la mayoría de las aplicaciones automotrices se utilizan motores trifásicos, por lo que, el inversor debe ser capaz de generar tres fases de corriente para alimentar correctamente al motor. La configuración electrónica de este tipo de inversores se muestra en la Figura 2.5.

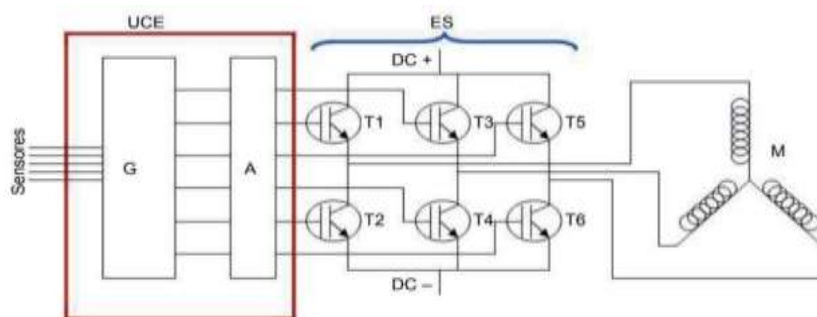


Figura 2.5 Diagrama eléctrico de un inversor trifásico

(Antoni et al., 2017, pág. 176)

Los interruptores de este circuito se accionan y cierran en un determinado orden con el objetivo de generar un voltaje que, por medio de la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM), se asemeje a una onda sinusoidal. Cada fase genera ondas que, en teoría, deberían ser iguales en valores eléctricos. No obstante, la diferencia está en que se encuentran desfasadas a 120 grados, lo que permite que el motor eléctrico funcione sin interrupciones. En una gráfica, las ondas senoidales generadas por el inversor trifásico se ven de la siguiente manera:

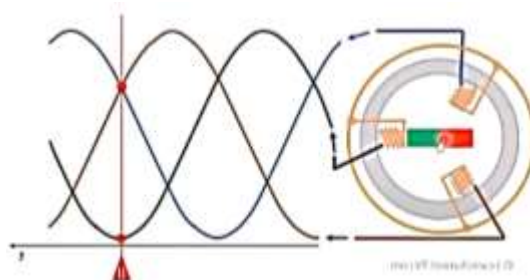


Figura 2.6 Señales de voltaje del inversor hacia el motor eléctrico

(AutoSoporteTV, 2022)

La eficiencia de los inversores usados en el área automotriz suele rondar entre el 85 y el 97%. Sin embargo, dichos valores suelen ser calculados en ambientes prácticamente estacionarios. En una prueba real, se estima que estas eficiencias pueden verse reducidas hasta en un 10%, dependiendo de las potencias de descarga y del motor eléctrico (López Martínez, 2016).

2.2.4 MOTOR ELÉCTRICO

En la actualidad, la aplicación de los motores eléctricos es extensa en muchos campos de la ingeniería, en especial en el de la ingeniería automotriz. Por tal motivo, se pueden hallar numerosos motores eléctricos en un vehículo actual, siendo en su mayoría, motores de corriente continua con escobillas e imanes permanentes (Lopez Martinez, 2015, pág. 51). Los motores utilizados en la tracción de VE deben contar con un alto rendimiento y vida útil. Algunos de los parámetros necesarios que deben poseer estos motores eléctricos son:

- Elevada relación par/inercia.
- Elevado par durante los arranques y en pendientes.
- Elevada potencia en autopista.
- Ruido acústico bajo y un costo razonable.
- En un amplio régimen de giro se requiere de potencia constante.

Los motores utilizados en los VE pueden ser de corriente continua (CC) o de corriente alterna (CA). Los recientes VE ocupan motores CA y CC sin escobillas.

2.2.4.1 Motor de corriente alterna (CA) asíncrono

El motor de corriente alterna (CA) asíncrono se compone de un estator con un campo inductor y de un rotor con un campo inducido (Wagemakers & Escribano Aparicio, 2017, pág. 368). El funcionamiento de este tipo de máquina se basa en el campo magnético giratorio que se genera mediante un devanado trifásico. En la cavidad del estator está presente el campo inductor casi uniforme en donde se inserta el rotor, cuyo giro se genera en el plano perpendicular al eje del estator.

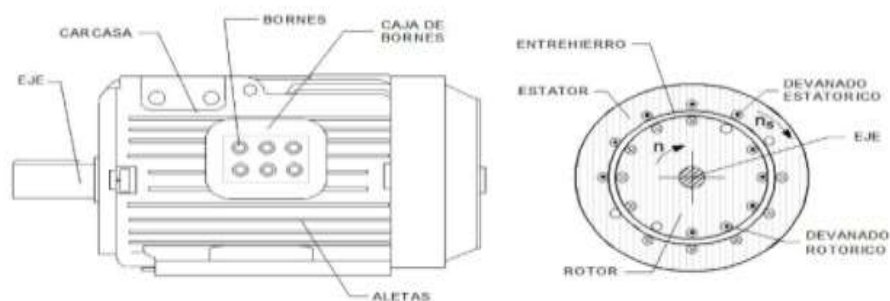


Figura 2.7 a) Aspecto exterior de una máquina asíncrona trifásica; b) vista de la sección interior

(Peñalvo Lopez et al., 2018, pág. 251)

En la figura 2.7 se muestra el aspecto exterior de una máquina asíncrona trifásica. Los motores de inducción generarán un campo magnético rotativo en el entrehierro producido por el efecto de las tres bobinas desfasadas 120° y alimentadas por un sistema trifásico (Iglesias Adolf, 2016).

Este tipo de motor es el más usado en vehículos eléctricos y consta de una carcasa que se parece a una jaula de ardilla de aluminio fundido. Posee un núcleo laminado en contacto sobre el eje y tiene tapas a ambos lados donde se hallan montados los baleros sobre los que gira el rotor. En el sistema trifásico se genera un campo magnético rotatorio en tres fases, además puede modificarse el sentido de rotación del campo al invertirse dos puntas (las que sea) del estator (Pimienta Dueñas, 2007).

El motor del Renault Twizy es de esta tipología, cuya potencia máxima es de 13 kW a 7250 rpm y un par máximo de 57 Nm a 2100 rpm. Los estándares IE3 de la Comisión Internacional Electrotécnica consideran que estos motores poseen un 95% de eficiencia energética en aplicaciones estáticas. No obstante, en los VEB se sacrifica el máximo de la eficiencia para obtener una mayor curva de rendimiento en un rango más amplio de velocidades. Un 75% de eficiencia se considera como un buen número para motores pequeños de velocidad variable (De Santiago et al., 2012).

2.2.4.2 Motor de corriente alterna (CA) síncrono

Los motores síncronos son máquinas de corriente eléctrica alterna (rotativos), donde su velocidad de giro está directamente relacionada con la frecuencia de tensión presente en los bornes (Blazquez Garcia et al., 2014, pág. 12).

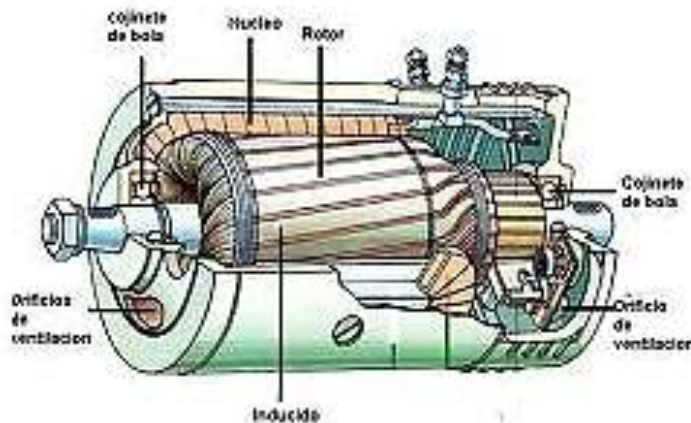


Figura 2.8 Motor de corriente alterna (CA) síncrono

(Wagemakers & Escribano Aparicio, 2017, pág. 394)

La fig. 2.8 muestra los diferentes elementos que conforman un motor de corriente alterna síncrono. Su funcionamiento se genera a través de la alimentación del rotor con corriente continua y, la alimentación de las bobinas del estator, con un sistema trifásico. Entonces se tiene dos campos, el generado por el estator y el generado por el rotor (de la Torre, 2019).

2.2.5 REDUCTOR

Es el elemento que sirve para transmitir el movimiento del motor eléctrico hacia las ruedas motrices del vehículo por medio de los ejes de transmisión. Como su nombre lo indica, realiza una reducción del movimiento giratorio, cuya desmultiplicación suele ser de 1:9,23 en el Twizy 80.

2.2.6 FRENO REGENERATIVO

De acuerdo con los autores Hamada & Orhan (2022), el sistema de freno regenerativo, conocido por sus siglas en inglés como RBS (Regenerative Brake System), se encarga de recuperar parte de la energía cinética del vehículo que se desperdicia durante el proceso de frenado y reutilizarla para cargar un sistema de almacenamiento de energía o, a su vez, usarla como propulsión adicional.

Existen varios tipos de RBS y suelen diferenciarse en base al tipo de sistema de almacenamiento de energía que llevan. Los VEB, por lo tanto, poseen un sistema de freno regenerativo eléctrico. Tener sistemas RBS eficientes es un procedimiento bastante complejo, debido a que, se encuentran influenciados por varios parámetros tanto del vehículo como del entorno. A continuación, se muestra una figura que detalla los factores que modifican el rendimiento del freno regenerativo:

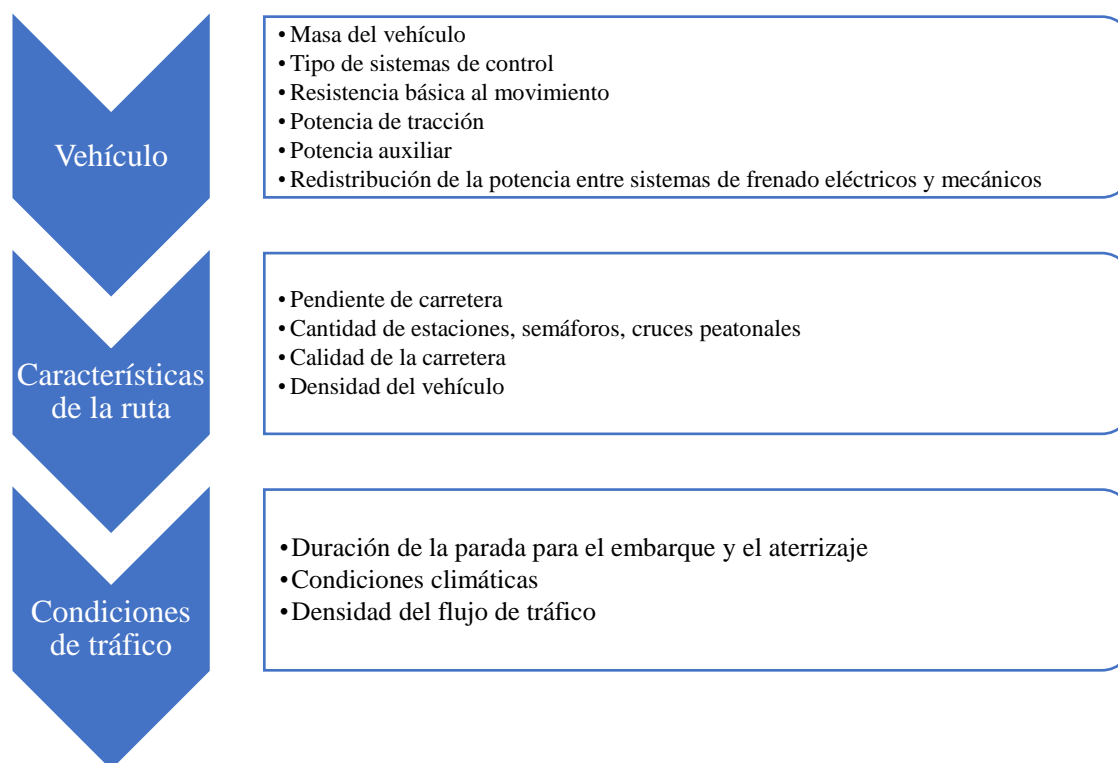


Figura 2.9 Clasificación de los factores que inciden en el consumo y la generación de energía de frenado

(Hamada & Orhan, 2022, pág. 3)

De forma sencilla, el funcionamiento de este sistema en un VEB convencional puede ser explicado de la siguiente manera: El rotor del motor eléctrico, al dar tracción, gira en el sentido de las agujas del reloj de acuerdo con el campo magnético generado en el estator. El rotor está unido a la transmisión y, por consiguiente, a las ruedas de tracción. En el instante en que el conductor quita el pie del pedal del acelerador, la computadora detecta una desaceleración y el inversor se encarga de cambiar el sentido de giro del campo magnético del estator, produciéndose así una fuerza contraria a la rotación del rotor y, por lo tanto, al giro de las ruedas. Es así como, los VEB reducen su velocidad sin la necesidad de aplicar el pedal del freno. No obstante, cuando el conductor pisa el pedal de freno se produce la mayor regeneración. Esto se debe a que hay más elementos que intentan frenar el movimiento inercial del rotor (campo magnético y frenos de disco). Por lo tanto, la fuerza que el rotor aplica para intentar continuar con su movimiento normal produce energía que es enviada hacia el inversor. Este se encargará de transformar la corriente alterna proveniente de la regeneración en corriente continua para ser almacenada en la batería.

Por otra parte, la potencia de carga del RBS depende de tres factores principales: la masa, la velocidad y la desaceleración del vehículo. Mientras mayor sea la desaceleración, mayor será la potencia de carga. En base a este concepto, existen generalmente tres niveles de regeneración. Si el vehículo tiene un nivel de regeneración 3 frenará mucho más al soltar el pedal del acelerador que uno de nivel 1. En otras palabras, la intensidad del campo magnético en sentido contrario que manda el inversor va a aumentar a medida que se incrementa el nivel de regeneración. El Renault Twizy posee un solo nivel de regeneración que es el nivel 1 que viene por defecto en varios VEB (AutoSoporteTV, 2022).

2.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

De forma básica, el rendimiento energético de un VE durante la conducción es el resultado del cociente entre la energía producida y la suministrada (Díez, 2019). Al comparar la eficiencia energética de un vehículo convencional con la de un VEB se puede apreciar una gran diferencia, siendo apenas un 25% para motores térmicos frente a un 90% de los eléctricos, esto debido a la ausencia de muchos mecanismos de engranajes y un bajo índice de pérdidas en forma de calor. El rendimiento o eficiencia de un vehículo se lo suele medir en base a dos etapas:

Etapa 1: Se mide la eficiencia de la transformación de energía a partir de una fuente primaria hasta su llegada a una estación de servicio. Las fuentes primarias pueden provenir de energías limpias como la energía hidráulica o de fuentes más comunes como los hidrocarburos.

Etapa 2: Se mide la eficiencia de la conversión del combustible o la energía almacenada en trabajo útil que mueve a la llanta del vehículo.

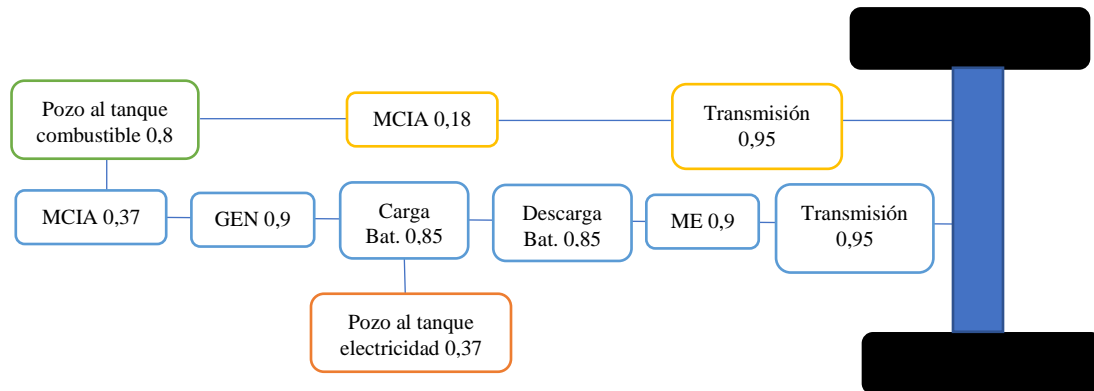


Figura 2.10 Rendimientos orientativos de los caminos energéticos para diferentes trenes de propulsión

(López Martínez, 2016, pág. 9)

El camino que se observa en la parte superior de la Figura 2.10 representa a la eficiencia de transformación de energía de un vehículo convencional con MCI. El camino intermedio, representa a un HEV (híbrido) y el camino inferior a un vehículo puramente eléctrico.

Para la etapa uno se tiene la siguiente tabla con los rendimientos orientativos de la transformación de energía:

Tabla 2.5 Rendimientos que llevan la energía del pozo al tanque del vehículo.

Camino del combustible	Rendimiento
Gasolina	0,80
Electricidad	0,37

Fuente: (López Martínez, 2016, pág. 10)

Para la etapa dos, en el caso de los vehículos eléctricos, se tiene la siguiente tabla con datos orientativos respecto a la eficiencia de la transformación de la energía desde el almacenamiento, hasta su uso en forma de potencia útil en las ruedas:

Tabla 2.6 Eficiencia de la conversión de energía a bordo en trabajo útil.

Vehículo eléctrico	
Rendimiento descarga de batería	0,85
Motor eléctrico y electrónica de potencia	0,90
Ganancia de rendimiento por frenada regenerativa	1,20
Rendimiento de transmisión	0,95
Eficiencia de transformación del combustible en trabajo útil	0,87

Fuente: (López Martínez, 2016, pág.11)

De esta forma, si se calcula la eficiencia en general del vehículo eléctrico, se procedería a multiplicar las eficiencias globales de las dos etapas. En el caso de los ejemplos orientativos, se multiplicaría la eficiencia de la transformación de energía del pozo al tanque (0,37) y la eficiencia de la transformación del combustible en trabajo para la rueda (0,87), dando un resultado de 0,32 o 32% para la eficiencia total del VE.

2.4 BALANCES ENERGÉTICOS EN EL VEHÍCULO

2.4.1 DINÁMICA DEL VEHÍCULO

Se encarga de describir el movimiento que tiene un vehículo en carretera durante su funcionamiento. En este proceso intervienen la fuerza de gravedad, la aerodinámica y la ejercida entre la carretera y los neumáticos.

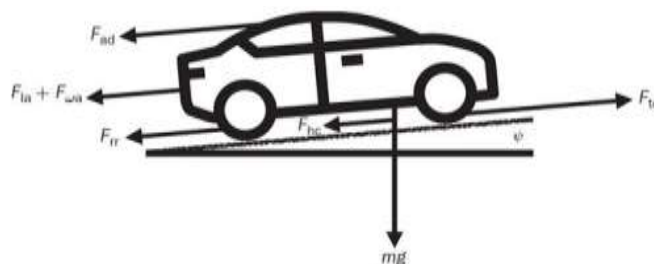


Figura 2.11 Diagrama de fuerzas para un vehículo rodante

(Enge et al., 2021, pág. 71)

En la fig. 2.11 se pueden apreciar las diferentes fuerzas que intervienen sobre un vehículo rodante y que se requieren para romper su estado de reposo. De forma traslacional, el movimiento dinámico de un vehículo en un eje coordenado se encuentra determinado por la sumatoria de todas las fuerzas que intervienen sobre él en dicho eje, acorde a la segunda Ley de Newton:

$$F_{tra} = F_{aero} + F_{rod} + F_{grav} + F_{al} + F_{\omega a} \quad [2.1]$$

Donde:

F_{tra} = la suma de todas las fuerzas, fuerza en rueda o esfuerzo de tracción total

F_{aero} = la resistencia aerodinámica

F_{rod} = la resistencia a la rodadura

F_{grav} = la resistencia a pendientes

F_{al} = la aceleración lineal

$F_{\omega a}$ = la aceleración angular

Como se muestra, la fuerza que se requiere (en Newtons) para mover un vehículo hacia adelante es igual a la suma de todas las fuerzas que se oponen a ese movimiento de avance.

2.4.1.1 Resistencia a la rodadura

La fuerza que se resiste a la rodadura de los neumáticos y actúa sobre el vehículo en dirección longitudinal, se expresa de la siguiente forma:

$$F_{rod} = W \cdot \cos \theta \cdot C_r \quad [2.2]$$

Donde:

W = Masa del vehículo multiplicado por la gravedad (9.8 m/s^2).

θ = Ángulo de pendiente en la que circula el vehículo medida en radianes.

C_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura (adimensional).

El peso del vehículo es directamente proporcional a la resistencia a la rodadura. Mientras más masa tenga, más se deformarán los neumáticos y, por lo tanto, mayor será la resistencia al

movimiento. Si los neumáticos de un determinado vehículo tienen un coeficiente de resistencia $C_r = 0.01$, la fuerza necesaria para mover una carga sobre dichos neumáticos es de 0.01 veces del peso de esa carga en libras. Es decir, se necesita 1 lbf para mover una carga de 100 lb sobre neumáticos con $C_r = 0.01$. A continuación, se muestran algunos coeficientes de resistencia comunes:

Tabla 2.7 Coeficientes de resistencia comunes de neumáticos.

Característica del neumático	C_r
Neumático en buen estado	0.006
Neumático promedio	0.010
Neumático malo	0.015
Neumático sobre arena	0.3

Fuente: (Enge et al., 2021, pág. 74)

2.4.1.2 Resistencia aerodinámica

Es la fuerza que impone el aire sobre el vehículo durante su movimiento. Para su cálculo, se suele utilizar la siguiente ecuación:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad [2.3]$$

Donde:

ρ = Densidad del aire en kg/m^3

A = Área frontal en m^2

C_d = Coeficiente aerodinámico (adimensional)

v^2 = Velocidad del vehículo al cuadrado en m/s

Si se realizan cálculos con esta fórmula es necesario aclarar que la densidad del aire es variable en función de la presión, la temperatura y la humedad. En condiciones ideales (15°C , aire seco y presión a nivel del mar), la densidad del aire es igual a $1,225 \text{ kg/m}^3$. Si dichos factores son distintos, se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 2.8 Constantes de presión, temperatura y densidad.

Masa molecular del aire	$M_{aire} = 28,9 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
Constante universal de los gases ideales	$R = 8,314472 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
Constante de gas ideal del aire	$R_{aire} = \frac{R}{M_{aire}} = 287 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$
Gradiente térmico	$\tau = \frac{dT}{dz} = -6,5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$
Temperatura a 0 m	$T_0 = 288\text{K}$
Presión a 0 m	$P_0 = 101325 \text{ Pa}$
Densidad del aire a 0 m	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Fuente: (Torres Macció, 2018, pág. 17)

Las ecuaciones para el cálculo de presión, temperatura y densidad en función de la altura z (medida en metros), son las siguientes:

$$T = T_0 + \tau \cdot z \quad [2.4]$$

$$P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{\tau}{T_0} \cdot z\right)^{\frac{g}{\tau \cdot R_{aire}}} \quad [2.5]$$

$$\rho_{aire} = \frac{P}{R_{aire} \cdot T} = \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{\tau}{T_0} \cdot z\right)^{\frac{g}{\tau \cdot R_{aire}} - 1} \quad [2.6]$$

2.4.1.3 Resistencia a pendientes

Si el vehículo circula por una pendiente, su movimiento se verá influenciado por la fuerza de la gravedad, misma que se expresa de la siguiente manera:

$$F_{grav} = W \cdot \text{Sen } \theta \quad [2.7]$$

Donde:

W = Masa del vehículo multiplicado por la gravedad (9.8 m/s^2).

θ = Ángulo de pendiente en la que circula el vehículo medida en radianes.

2.4.1.4 Fuerza de la aceleración lineal

El vehículo tiene una fuerza producida por la aceleración lineal que se expresa de la siguiente manera:

$$F_{al} = m \cdot a \quad [2.8]$$

Mientras mayor sea la masa y mayor sea la aceleración se requerirá una mayor fuerza. Si existe una desaceleración, F_{al} será negativa.

2.4.1.5 Fuerza de la aceleración angular

Esta fuerza surge del movimiento rotacional de las piezas del vehículo. Para determinarla, se usan cálculos complejos. Por este motivo, el valor sugerido de acuerdo con Larminie & Lowry (2003) es el factor de fudge, que asume que $F_{\omega a}$ es aproximadamente el 5% de F_{al} .

$$F_{\omega a} + F_{al} \approx 1,05 \cdot F_{al} \quad [2.9]$$

De igual manera, si el vehículo está desacelerando, el valor de $F_{\omega a}$ es negativo. Esto quiere decir que se necesita una fuerza contraria que reduzca el momento lineal del vehículo y el momento angular de sus partes en movimiento giratorio.

2.4.2 POTENCIA Y ENERGÍA

2.4.2.1 Potencia de tracción

La potencia de tracción o la potencia requerida para mover al vehículo con una velocidad y aceleración determinadas por una carretera, está definida por la multiplicación entre la fuerza de tracción total y la velocidad lineal del vehículo, misma que se mide en kW:

$$P_{tra} = F_{tra} \cdot v \quad [2.10]$$

La energía que es consumida en la rueda se calcula de la integral de la potencia de tracción en función del tiempo y se representa con la siguiente ecuación:

$$E_{rueda} = \int P_{tra} \cdot dt \quad [2.11]$$

2.4.2.2 Potencia del motor eléctrico

El cálculo de la potencia del motor eléctrico medida en kW, se lo puede hacer en base a la potencia de tracción, usando la siguiente relación:

$$P_{motor} = \frac{P_{tra}}{\eta_{transmisión}} \quad [2.12]$$

Además, en base a la misma potencia de tracción, se puede calcular la potencia del combustible, o, en el caso de los vehículos eléctricos de la batería, por medio de la siguiente ecuación:

$$P_{combustible} = \frac{P_{tra}}{\eta_{motor\ eléctrico} \cdot \eta_{descarga\ batería}} \quad [2.13]$$

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DEFINICIÓN MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se desarrolla la metodología utilizada para llevar a cabo los objetivos planteados. Las tareas por realizar se ordenaron de manera metódica con el objetivo de que sean perceptibles y replicables para su comprobación.

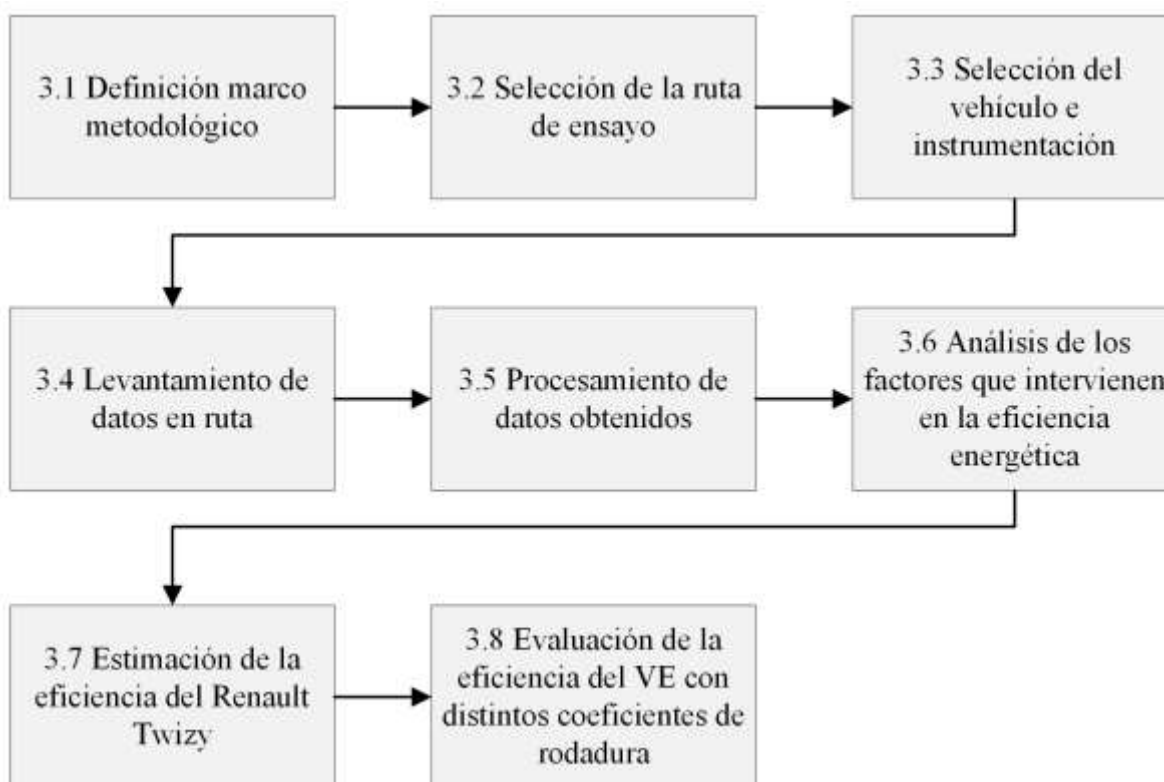


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de análisis de la eficiencia de un VE

Una vez definido un camino general, es necesario saber qué y cómo se realizará la actividad principal en el trabajo, mismo que consiste en calcular la eficiencia energética del Renault Twizy. Para esto, se elaboró el siguiente esquema en el que se muestran los distintos tramos del tren motriz del VE y los caminos que se siguieron para la toma de datos:

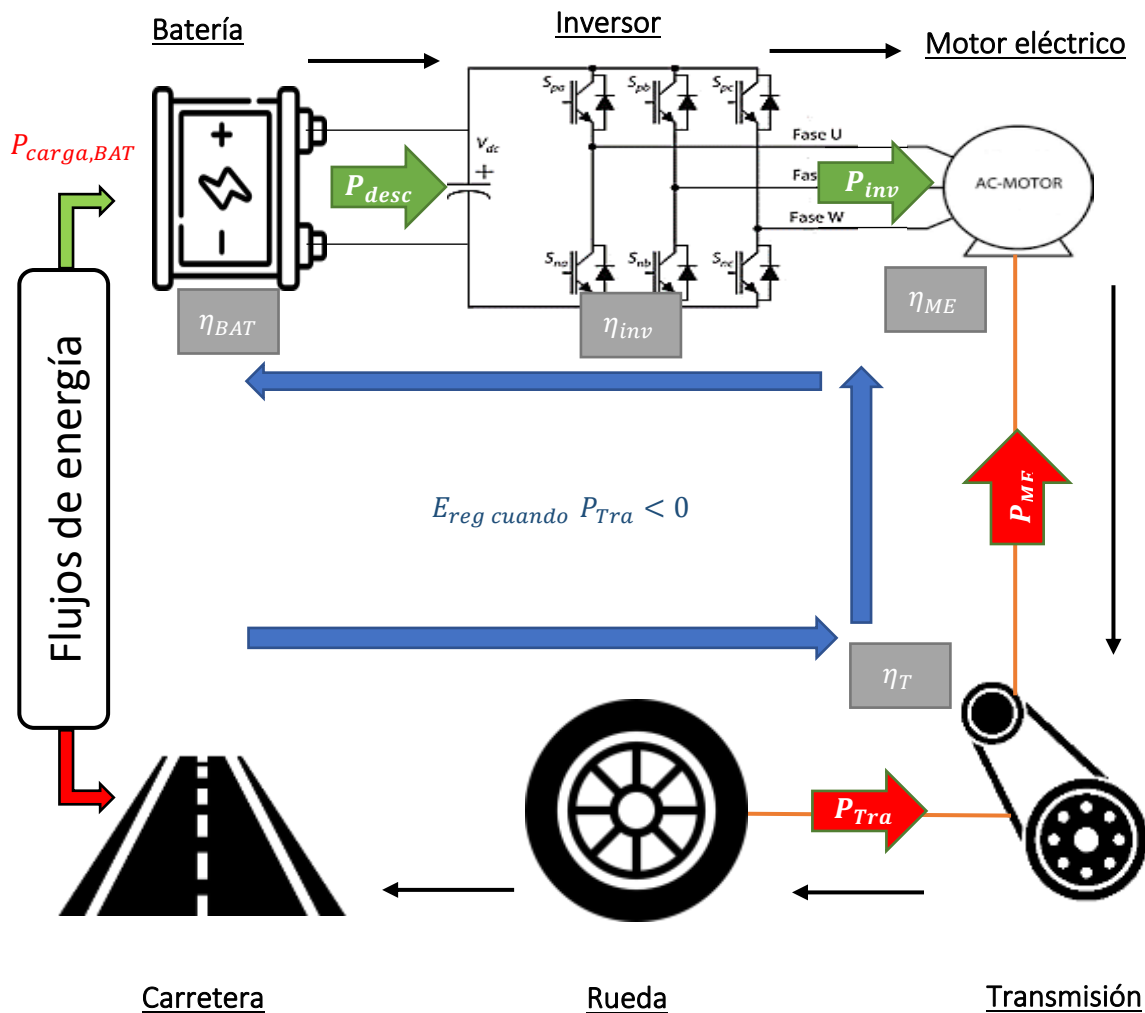


Figura 3.2 Metodología para el cálculo de la eficiencia en un VE

Como se observa en la Figura 3.2, se busca obtener eficiencias individuales de los elementos de tren motriz del VE durante la prueba de ruta. Para esto, se siguieron dos flujos de energía: el primero va desde la batería hasta el motor eléctrico y se usaron un escáner automotriz (datos de

batería de tracción) y un analizador de energía trifásico (datos a la salida del inversor) para la obtención de parámetros; y el segundo va desde la carretera en contacto con el neumático hasta el motor eléctrico y se usó un GPS datalogger (datos cinemáticos del vehículo para potencia de tracción). Una vez generados los datos de potencia en cada tramo, se transformaron las potencias en energía (Wh) y se utilizaron fórmulas básicas (energía de salida vs energía de entrada) para el cálculo de la eficiencia del vehículo en su etapa de uso (del tanque a la rueda). Es importante aclarar que las líneas naranjas simbolizan una conexión mecánica entre elementos, mientras que, las líneas negras se refieren a una conexión eléctrica. Por su parte, las flechas de color negro representan la dirección que la energía recorre desde la batería hasta llegar a la rueda en contacto con la carretera.

La ganancia por frenada regenerativa se calculó en base a valores de corriente negativa a la salida de la batería que se generaron durante las desaceleraciones. El factor de la cantidad de energía que el sistema de freno regenerativo admite durante la carga, se obtuvo con la ayuda del escáner automotriz y de la energía de frenado.

3.2 SELECCIÓN DE RUTA DE ENSAYO

Para el presente estudio no ha sido necesario realizar una nueva ruta de ensayo desde cero. Esto se debe a que ya existen investigaciones como la de (Paillacho & Tequis, 2022), o la de los autores (Camuendo & Pastaz, 2021), en las que se diseñan rutas de estudio para el Renault Twizy o vehículos de categorías similares. La ruta seleccionada debe cumplir con el Reglamento UE 2017/1151, debido al tipo de datos (pruebas reales en carretera) que se pretenden recolectar. Los ciclos de conducción WLTP en este caso no fueron aplicados puesto a que son netamente para pruebas estáticas en dinamómetro. En la Tabla 3.1 se pueden observar los distintos parámetros que la ruta seleccionada debe cumplir:

Tabla 3.1 Requerimientos para la generación de rutas de ensayo

Parámetro	Requerimientos		
	Urbana	Rural	Autopista
Porcentaje del total de recorrido	~ 34% (Nunca inferior al 29% de la distancia total del trayecto)	~ 33%	~ 33%
Velocidad media (incluyendo paradas)	15 – 40 km/h	60 – 90 km/h	>90 km/h
Distancia mínima recorrida	16 km como mínimo por cada ruta		
Duración del trayecto	De 90 a 120 minutos		
Diferencia de altura	No habrá diferencia superior a 100m de altura desde el punto inicial al final de la ruta.		
Porcentaje de paradas	Del 6 al 30% del total del trayecto de la ruta urbana		

Fuente: (Diario Oficial de la Unión Europea, 2017)

La ruta se seleccionó en base a la localidad del vehículo, debido a que, es necesario que se inicie y se termine en el mismo punto, eliminando incoherencias en las mediciones por la energía potencial que aumenta con la diferencia de altura del terreno.

Los detalles de la ruta seleccionada se mostrarán en el Capítulo IV del presente trabajo.

3.3 SELECCIÓN DEL VEHÍCULO E INSTRUMENTACIÓN

3.3.1 RENAULT TWIZY

El Renault Twizy 80 es un vehículo netamente eléctrico de 4 ruedas monoplaza (un solo asiento), cuyas características técnicas se detallan en la Tabla 3.2.



Figura 3.3 Renault Twizy

Tabla 3.2 Datos técnicos del Renault Twizy 80

Componente	Descripción	Valor	
Batería de tracción	Voltaje nominal	58 V	
	Capacidad	6,1 kWh \approx 130 Ah	
	Peso	98 kg	
	Dimensiones	0,828 m x 0,478 m x 0,233 m	
	Densidad de energía	66,15 kWh/m ³	
	Energía específica	62,24 Wh/kg	
	Consumo medio ciclo urbano ECE-15	6,3 kWh/100 km	
Motor	Potencia máxima	13 kw	
	Par máximo	57 Nm	
Transmisión	Relación de transmisión	1:9,23	
	Eficiencia	96 %	
Carrocería	Coefficiente aerodinámico Cx	0,64	
	Dimensiones	Largo	2,338 m
		Ancho total	1,381 m
		Alto	1,454 m
	Área frontal efectiva	1,472 m ²	
Peso total	690 kg		

Fuente: (Motoreu, 2016)

3.3.2 INSTRUMENTACIÓN

3.3.2.1 Instrumentación para la obtención de parámetros cinemáticos del vehículo durante la conducción.

- **GPS Data logger**

Para el análisis se hizo uso de un dispositivo llamado data logger GPS que permite el preciso almacenamiento de distintos parámetros como: velocidad, altitud, posición, distancia, pendiente, entre otros. El equipo GPS seleccionado fue el Columbus P-1 Profesional, que se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4 GPS Data logger Columbus

(Columbus, n.d., pág. 1)

Este dispositivo es capaz de registrar datos a tres distintas frecuencias configurables: 1, 5 y 10 Hz. Además, puede ser configurado para brindar un archivo de registro con diferentes extensiones. Dichas extensiones son: CSV (formato de código simple), GPX (formato de intercambio común) y NMEA (formato NMEA 0183). El formato que se consideró más adecuado fue el CSV; esto se debe a que es compatible con el programa Microsoft Excel, mismo que, permite visualizar los datos obtenidos de una manera idónea. Además, posee tres formas de funcionamiento, cuyas características y modo de activarlas se muestran a continuación:

- ✓ **Modo normal:** Se encarga de tomar datos a la frecuencia especificada por el archivo de configuración.

- ✓ Modo de detección de movimiento: Permite la toma de datos únicamente cuando el dispositivo se encuentra en movimiento. Suele usarse para evitar datos redundantes que se generen en paradas durante la ruta.
- ✓ Modo de seguimiento de espionaje: Registra únicamente 8 datos en un determinado tiempo. Se usa principalmente para ocasiones en las que la carga del dispositivo no sea posible, y se requiera de su uso prolongado.

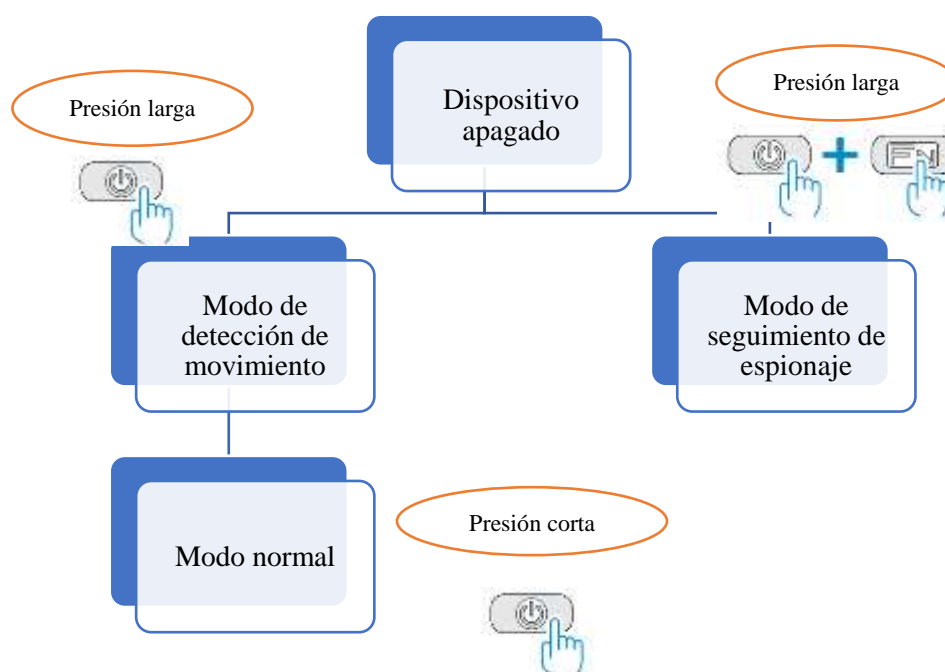


Figura 3.5 Modos de funcionamiento del GPS data logger Columbus

Por otro lado, el software Time Album Pro, recomendado por Columbus es el encargado de generar la ruta en Google Maps. Además, brinda información útil como la distancia total del recorrido, distancias recorridas tanto en pendientes ascendentes como descendentes y, el intercambio entre los distintos formatos que se mencionaron anteriormente.

3.3.2.2 Instrumentación para la toma de datos que intervienen en la eficiencia del vehículo

- **Scanner Automotriz Autel Maxicheck MX808**

Para la obtención de varios parámetros, principalmente en la salida de la batería de tracción, se utilizó el escáner automotriz Autel Maxicheck MX808. Este equipo consta de una Tablet android y el conector de diagnóstico. En su pantalla se muestran los datos que se pueden escanear a tiempo real, además de permitir la grabación de datos que son almacenados en un archivo con extensión .DAT que pueden ser leídos por medio de la aplicación Maxicheck.



Figura 3.6 Escáner automotriz Autel Maxicheck MX808

(Autel, n.d., pág. 16)

- **Registrador trifásico de calidad eléctrica AEMC 8335**

Este analizador de energía permite la observación y el registro de distintos parámetros relacionados con la calidad eléctrica de redes monofásicas o trifásicas de corriente alterna en tiempo real. Consta del equipo que se muestra en la Figura 3.7 y de varios cables entre los que se incluyen 4 pinzas amperimétricas capaces de detectar corrientes de hasta 1000 A.

Se utilizó para analizar valores de voltaje y amperaje a la salida del inversor trifásico.



Figura 3.7 Registrador trifásico de calidad eléctrica AEMC 8335

(Chauvin Arnoux Group, 2012, pág. 1)

3.4 LEVANTAMIENTO DE DATOS EN RUTA

3.4.1 CONSIDERACIONES PARA LAS PRUEBAS EN RUTA

Las pruebas en ruta fueron realizadas en días laborables en un horario cercano al medio día con el fin de obtener datos lo más próximos a la realidad, considerando el tráfico vehicular circulante en la ciudad. Debido a la reducción de los estragos de la pandemia, los centros educativos y actividades laborales retomaron la presencialidad, por lo que, el tráfico vehicular ha aumentado considerablemente y se esperan resultados relativamente distintos a los de investigaciones anteriores relacionados con el mismo vehículo

Previo a realizar el recorrido, se tuvo que seguir una serie de inspecciones con el fin de garantizar la seguridad del ocupante del vehículo como, por ejemplo: inspección de neumáticos, nivel de fluidos, sistema de seguridad activo y pasivo, elementos de suspensión y dirección, y componentes eléctricos del vehículo. Además, se usaron implementos de protección personal para evitar riesgos durante la instalación de los equipos en el vehículo para la toma de datos.

Para cumplir con la prueba se recorrió en su totalidad la ruta de ensayo. Por lo tanto, la ejecución del recorrido también abarca la descarga completa del paquete de baterías del vehículo eléctrico. Cabe mencionar que, si cualquier tipo de eventualidad presente en la trayectoria de la ruta provoca la permanencia en parado del vehículo eléctrico por varios minutos, se dará por terminada la prueba. Los datos que se recolectan cuando las paradas son excesivamente prolongadas no son de utilidad y la prueba deberá reiniciarse.

3.4.2 CONFIGURACIÓN E INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS

3.4.2.1 GPS Data logger

- **Configuración:**

Para la configuración de este equipo se descargó el archivo CONFIG.txt disponible en la página oficial de Columbus. Posteriormente, se la instaló en el GPS mediante el uso de una tarjeta microSD. El único valor que se modificó de dicha configuración fue la zona horaria, que venía por defecto con el valor de +00:00. A continuación, se muestra la Tabla 3.3 con los diferentes parámetros establecidos:

Tabla 3.3 Parámetros del archivo CONFIG.txt para el GPS data logger

Settings	Record	Unit
TimeZone=-05:00	Format=CSV	Speed=km/h Distance=m
SpeedAlert=OFF	LogMode=1Hz	
AutoPowerOn=OFF	SpeedMask=OFF	
Beeper=ON	SpyModeTimer=15	
FunctionButton=Pause	OneTrackPerDay=OFF	

La Tabla 3.4 brinda una explicación detallada de los datos que se obtienen del formato CSV. Con esto se puede concebir todos los números que registra este equipo, para su posterior procesamiento y análisis.

Tabla 3.4 Formato de los datos obtenidos por el GPS data logger P-1.

Parámetro	Unidades, formato
Tipo de punto de paso.	T: Punto normal
Fecha	(año/mes/día)
Hora	(hora/minuto/segundo)
Latitud	grados, minutos, segundos (°,';''')
Longitud	grados, minutos, segundos (°,';''')
Altura sobre el nivel del mar	metros (m)
Velocidad	Kilómetros por hora (km/h)
Rumbo sobre el suelo	grados (°)
Distancia entre punto y punto	metros (m)

Es pertinente aclarar que, los datos de aceleración y distancia no son proporcionados directamente por el GPS. Para obtenerlos, fue necesario realizar cálculos simples con fórmulas de movimiento rectilíneo uniformemente variado mediante el programa Excel. La comprobación de los datos obtenidos se realizó mediante la suma de la distancia total recorrida en la prueba piloto. Al comparar los datos calculados por el Software Time Álbum Pro, se observó una mínima diferencia, por lo que, se validó el cálculo de estas dos variables con dichas fórmulas.

- **Instalación:**

Se ubicó el GPS data logger al costado de una de las puertas del vehículo, tal y como se observa en la Figura 3.8. De esta forma, el equipo pudo recibir adecuadamente las señales, sin omitir que, su manipulación fue sencilla desde la ubicación del conductor.

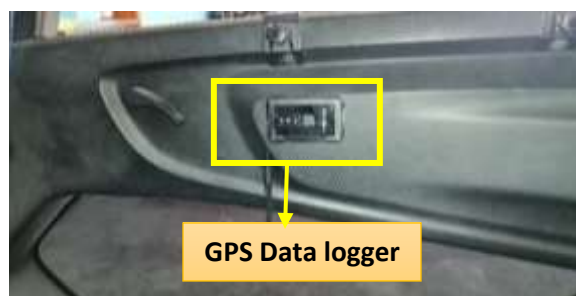


Figura 3.8 Instalación de GPS en el vehículo

3.4.2.2 Scanner Autel MaxiCheck MX808

Este escáner de diagnóstico electrónico automotriz cuenta con distintas funciones, como la capacidad de acceder mediante OBDII a información en tiempo real del vehículo.

Una vez conectado el escáner con el vehículo, se procedió a visualizar los parámetros a los que este dispositivo podía acceder, mismos que se detallan a continuación:

- **Módulos electrónicos equipados en el vehículo**

Mediante la función de “Leer componentes” del scanner se puede monitorear los diferentes módulos que posee el vehículo.

En la Tabla 3.5 se muestran los 23 componentes para el módulo de cuadro de instrumentos donde se puede apreciar a su vez los parámetros monitoreados por el sistema BMS que se encarga de la gestión y control del paquete de baterías, parámetros tales como tensión, energía acumulada, temperatura, corriente, etc.

Tabla 3.5 Datos disponibles del Renault Twizy en scanner Autel MaxiCheck MX808

Cuadro de instrumentos			
Nombre	Valor	Rango	Unidad
1. Cierre relé de tracción no autorizado	-	-	-
2. Batería de tracción	-	-	-
3. Temperatura interna del calculador	-	-	-
4. Estado del vehículo	-	-	-
5. Unidad de distancia	-	-	-
6. Tipo Vehículo	-	-	-
7. Energía acumulada durante la descarga	-	0...65 000	kWh
8. Carga batería de tracción	0	0...100	%
9. Estado de la batería de tracción	-	0...100	%
10. Energía medida por BMS	5,9	0...50	kWh
11. Corriente medida por BMS	0	-1 000...500	A
12. Kilometraje total batería de tracción	-	0...655 350	km
13. Medida tensión batería de tracción	58	0...500	V
14. Posición pedal acelerador	0	0...253	-
15. Potencia instantánea del ondulator	-	-100...100	%
16. Señal RPM Motor	0	-20 000...20 000	rpm
17. Temperatura del motor	29	-40...214	°C
18. Tensión alimentación calculador	-	0...15,87	V
19. Odometría	-	0...655 350	km
20. Potencia máxima autorizada en carga	2,1	-	kW
21. Pedal del freno	-	-	-
22. Tensión de mando DCDC	-	12...16	V
23. Temperatura interna del calculador	-	-40...214	°C

- **Selección de componentes**

Se consideraron siete parámetros importantes para el estudio, mismos que se presentan en la Tabla 3.6, junto a sus unidades de medición. Para la obtención de estos parámetros, a través del scanner automotriz se realizó un monitoreo en condiciones de tráfico real hasta que el VE se

descargue en su totalidad. Esto se lo hace mediante el registro de los datos con la función que incorpora el equipo.

Tabla 3.6 Datos de mayor relevancia del scanner Autel MaxiCheck MX808

Componente	Valor	Rango	Unidad
Carga batería de tracción	100	0...100	%
Energía medida por BMS	5,9	0...50	Kilovatio Hora (kWh)
Corriente medida por BMS	2	-1 000...500	Amperios(A)
Medida tensión batería de tracción	58	0...500	Voltios(V)
Posición pedal acelerador	0	0...253	Se muestra sin unidades porque es una medida relativa acorde al desplazamiento angular del pedal; siendo 0 cuando no se acciona el pedal y 253 cuando se presiona a fondo.
Señal RPM Motor	0	-20 000...20 000	Revoluciones por minuto (rpm)
Temperatura del motor eléctrico	29	-40...214	Grados centígrados (°C)

Estos componentes han sido escogidos porque se relacionan directamente con la descarga y consumo de energía de la batería de tracción y, por consecuencia, con la eficiencia del VE. Asimismo, estos parámetros mostraron variaciones durante la prueba en ruta a diferencia de otros valores que se mantuvieron constantes y no aportaban al estudio.

3.4.2.3 Analizador de energía AEMC 8335

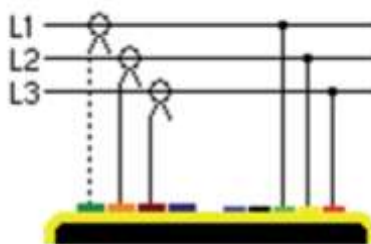
Este equipo tiene la capacidad de registrar a diferentes frecuencias varios parámetros relacionados con la calidad eléctrica de redes trifásicas. Su configuración es bastante sencilla y su pantalla permite una fácil manipulación. Para la toma de datos, se utilizó una configuración predeterminada que registra todos los parámetros que el equipo permite. No obstante, los más importantes que se tomaron en cuenta para el análisis se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Valores principales del analizador de energía AEMC 8335

Parámetro	Unidad
Voltaje RMS 1	(V)
Voltaje RMS 2	(V)
Voltaje RMS 3	(V)
Amperaje 1	(A)
Amperaje 2	(A)
Amperaje 3	(A)
Potencia 1	(W)
Potencia 2	(W)
Potencia 3	(W)
Potencia total	(W)
Consumo total	(Wh)

- **Instalación:**

Para su instalación fue necesario verificar el tipo de conexión que la red trifásica tiene en el motor eléctrico del Renault Twizy. Luego de una inspección visual y de una investigación del motor, se concluyó que la conexión trifásica era del tipo delta, por lo tanto, las pinzas amperimétricas y los lagartos de voltaje debían ser conectados como se observa en la Figura 3.9.

**Figura 3.9** Conexión del equipo hacia la red trifásica en delta.

(Chauvin Arnoux Group, 2012, pág. 17)

En base a lo representado en el manual, se realizaron las conexiones de las tres pinzas amperimétricas y de los cables de voltaje en el vehículo eléctrico con la ayuda de guantes clase 1 para evitar riesgos eléctricos.

3.5 PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS

3.5.1 PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS DEL DATALOGGER GPS

La información almacenada en la memoria del data logger se encontró en un formato separado por comas (CSV), cuyo procesamiento es muy sencillo. El archivo se ejecutó con el software Microsoft Excel para la visualización de los registros.

3	NRO.	HORA LOCAL	LATITUD	N/S	LONGITUD	E/W	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/s)	DISTANCIA (m)	ACELERACIÓN (m/s ²)
4										
5	1	12:45:00	0.359548	N	-78.110305	W	2210.9	0	0	0
6	2	12:45:01	0.359548	N	-78.110305	W	2210.9	0	0	0
7	3	12:45:02	0.359548	N	-78.110305	W	2210.9	0	0	0
8	4	12:45:03	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
9	5	12:45:04	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
10	6	12:45:05	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
11	7	12:45:06	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
12	8	12:45:07	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
13	9	12:45:08	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
14	10	12:45:09	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
15	11	12:45:10	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
16	12	12:45:11	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
17	13	12:45:12	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
18	14	12:45:13	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
19	15	12:45:14	0.359548	N	-78.110307	W	2210.9	0	0	0
20	16	12:45:15	0.35955	N	-78.110308	W	2210.9	0.03611111	0.01805556	0.03611111
21	17	12:45:16	0.359545	N	-78.110308	W	2210.9	1.16777778	0.60194444	1.13166667
22	18	12:45:17	0.35953	N	-78.110302	W	2211	2.07833333	1.62305556	0.91055556
23	19	12:45:18	0.359508	N	-78.110292	W	2211.2	3.24611111	2.66222222	1.16777778
24	20	12:45:19	0.359473	N	-78.11028	W	2211.4	4.66611111	3.95611111	1.42
25	21	12:45:20	0.359427	N	-78.110272	W	2211.6	5.59194444	5.12902778	0.92583333
26	22	12:45:21	0.359377	N	-78.110267	W	2211.7	5.41722222	5.50458333	-0.17472222
27	23	12:45:22	0.359328	N	-78.110262	W	2211.8	5.12888889	5.27305556	-0.28833333

Figura 3.10 Procesamiento de datos obtenidos con el GPS datalogger

3.5.2 PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS DEL SCANNER AUTEL MAXICHECK MX 808

Los datos mostrados en la Tabla 3.6 fueron obtenidos en una sola prueba experimental a través del scanner Autel MaxiCheck MX 808 mediante el recorrido de la ruta de ensayo que abarca las secciones urbana, rural y autopista.

El tiempo total de registro de los parámetros seleccionados fue de 2 horas con 13 minutos teniendo una cantidad de 7 690 datos por cada uno. Esta información fue procesada segundo a

segundo a través de visualización directa de cada parámetro para su posterior registro en una hoja de cálculo de Excel.

	NRO.	HORA LOCAL	CARGA BATERÍA DE TRACCIÓN	ENERGÍA MEDIDA POR BMS	CORRIENTE MEDIDA POR BMS	MEDIDA TENSIÓN BATERÍA DE TRACCIÓN	POSICIÓN PEDAL ACELERADOR	SEÑ RPM MOTOR	TEMPERATURA MOTOR ELÉCTRICO
3									
4		h/m/s	%	kWh	A	V	0-253	rpm	°C
5	1	12:45:00	96	5.8	2	57	0	0	29
6	2	12:45:01	96	5.8	2	57	0	0	29
7	3	12:45:02	96	5.8	2	57	0	0	29
8	4	12:45:03	96	5.8	2	57	0	0	29
9	5	12:45:04	96	5.8	2	57	0	0	29
10	6	12:45:05	96	5.8	2	57	0	0	29
11	7	12:45:06	96	5.8	2	57	0	0	29
12	8	12:45:07	96	5.8	2	57	0	0	29
13	9	12:45:08	96	5.8	2	57	0	0	29
14	10	12:45:09	96	5.8	2	57	0	0	29
15	11	12:45:10	96	5.8	2	57	0	0	29
16	12	12:45:11	96	5.8	2	57	0	0	29
17	13	12:45:12	96	5.8	2	57	0	0	29
18	14	12:45:13	96	5.8	2	57	0	0	29
19	15	12:45:14	96	5.8	2	57	44	40	29
20	16	12:45:15	96	5.8	8.25	57	129	10	29
21	17	12:45:16	96	5.8	33.25	57	203	230	29
22	18	12:45:17	96	5.8	55.25	56	206	610	29
23	19	12:45:18	96	5.8	68.25	56	206	880	29
24	20	12:45:19	96	5.8	98.75	56	205	1310	29
25	21	12:45:20	96	5.8	119.5	56	205	1740	29

Figura 3.11 Procesamiento de datos obtenidos con el scanner automotriz

3.5.3 PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA AEMC 8335

Los datos mostrados en la Tabla 3.7 se obtuvieron a través del analizador de energía AEMC 8335, por lo que, fue necesario usar el software Dataview recomendado por el fabricante para la exportación de datos del equipo. Dicho software permitió la visualización (números y gráficas) de todos los parámetros relacionados con la calidad eléctrica de la red trifásica del inversor y su principal ventaja es que exporta todos los datos directamente en una hoja de Excel.

2	3	4	NRO.	HORA LOCAL	VOLTAJES EN 3 FASES			AMPERAJE EN 3 FASES			POTENCIA EN 3 FASES			CONSUMO EN 3 FASES			POTENCIA TOTAL	CONSUMO TOTAL
					V1 RMS	V2 RMS	V3 RMS	A1 RMS	A2 RMS	A3 RMS	W1	W2	W3	Wh1	Wh2	Wh3	W Total	Wh Total
					V	V	V	A	A	A	W	W	W	Wh	Wh	Wh	W	Wh
5	1	12:45:00	11.8	11.8	11.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	2	12:45:01	11.6	11.5	11.5	0	0	11	0	0	0.73	0	0	0	0	0.73	0	
7	3	12:45:02	11.7	11.6	11.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	4	12:45:03	11.8	11.8	11.6	0	11.1	0	0	2.83	0	0	0	0	2.83	0	0	
9	5	12:45:04	11.6	11.5	11.5	0	0	10.4	0	0	0.68	0	0	0	0.68	0	0	
10	6	12:45:05	11.7	11.7	11.6	0	10.3	10.1	0	2.46	0.78	0	0	0	3.24	0	0	
11	7	12:45:06	11.8	11.8	11.6	0	10.6	0	0	2.04	0	0	0	0	2.04	0	0	
12	8	12:45:07	11.6	11.6	11.5	0	10.2	10	0	2.46	0.73	0	0	0	3.19	0	0	
13	9	12:45:08	11.7	11.7	11.6	0	10.5	0	0	3.09	0	0	0	0	3.09	0	0	
14	10	12:45:09	11.8	11.8	11.6	0	0	10.7	0	0	0.73	0	0	0	0.73	0	0	
15	11	12:45:10	11.7	11.6	11.5	0	10.7	0	0	2.35	0	0	0	0	2.35	0.01	0	
16	12	12:45:11	11.8	11.8	11.7	0	10.5	0	0	2.3	0	0	0	0	2.3	0.01	0	
17	13	12:45:12	11.9	11.8	11.6	0	10.9	0	0	2.56	0	0	0.01	0	2.56	0.01	0	
18	14	12:45:13	11.7	11.6	11.5	0	10.1	10.4	0	2.3	0.68	0	0.01	0	2.98	0.01	0	
19	15	12:45:14	11.7	11.6	11.5	0	10.1	10.4	0	2.3	0.68	0	0.01	0	2.98	0.01	0	
20	16	12:45:15	11.8	11.7	11.6	98.5	94.9	87.8	32.86	24.85	28.36	0.01	0.01	0.01	86.07	0.03	0	
21	17	12:45:16	11.8	11.7	11.6	224.1	231.6	217.9	246.71	276.53	246.76	0.08	0.09	0.08	770	0.25	0	
22	18	12:45:17	12.1	12	11.9	266.5	269.4	251.9	738.87	744.15	685.76	0.28	0.3	0.27	2168.78	0.85	0	
23	19	12:45:18	12.6	12.5	12.3	262.5	267	251.3	1099.38	1134.49	1048.05	0.59	0.61	0.56	3281.93	1.76	0	
24	20	12:45:19	13.5	13.3	13.2	260.8	264.3	248.6	1471.74	1498.4	1398.98	1	1.03	0.95	4369.13	2.97	0	

Figura 3.12 Procesamiento de datos obtenidos con el analizador de energía AEMC 8335

3.6 ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL VE

El análisis de factores de influencia se considera como una base para la predicción precisa del consumo de energía y por ende para la eficiencia de un VE. El consumo de energía en condiciones de conducción del mundo real se ha convertido en un índice de rendimiento clave para los conductores de VE y los fabricantes de automóviles, ya que tiene un enorme influjo en la eficiencia energética (Zhang et al., 2020).

Existen numerosos factores que influyen en el consumo de energía de un EV. La Figura 3.13 enumera todos los principales y los clasifica en 6 grupos: 1) Tecnología y factores del vehículo, 2) Factores del entorno artificial, 3) Factores ambientales naturales, 4) Factores de conducción, 5) Factores del tipo de viaje, 6) Factores de medida.

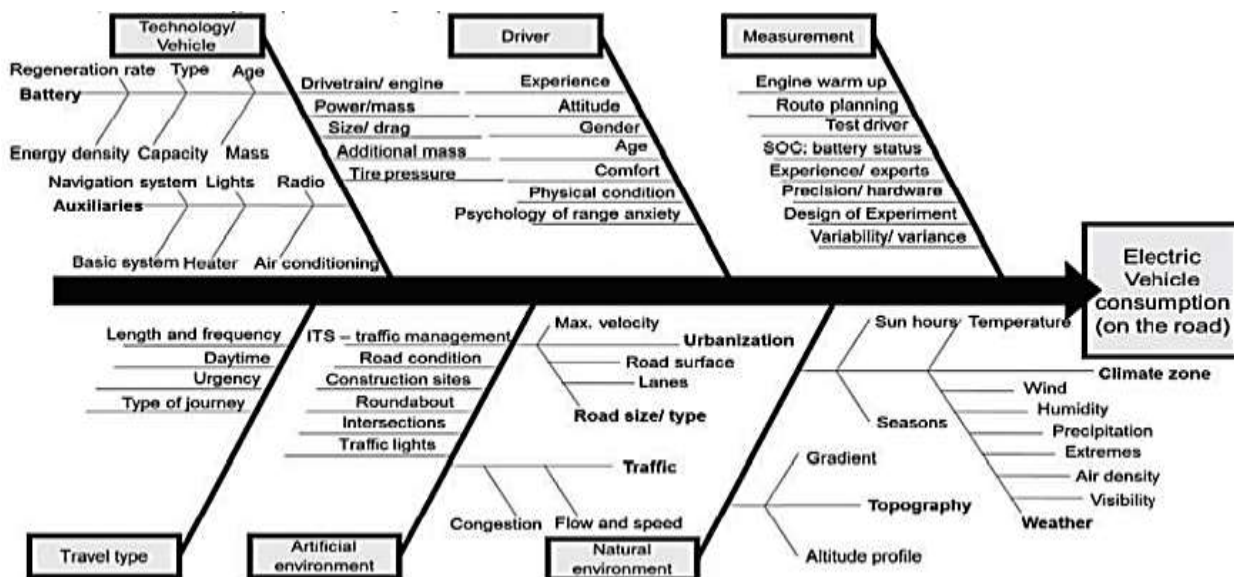


Figura 3.13 Diagrama de los factores que influyen en el consumo de VE

(Li et al., 2016, pág. 354)

Sin embargo, muchos de estos factores son incontrolables y representan un reto al experimentar en condiciones reales. Además, algunos de estos representan una alta demanda de recursos, por lo que, para el presente estudio se seleccionaron 4 factores con posibilidad de ser estudiados y se detallan a continuación:

3.6.1 TECNOLOGÍA Y FACTORES DEL VEHÍCULO

El sistema de batería es uno de los elementos centrales de un VE, y su tecnología representa un alto impacto con el consumo de energía. Los factores incluyen el SOC, tipo de batería, número de celdas, y el diseño del sistema de gestión (BMS). Estos factores determinan la capacidad de la batería, la intensidad de la energía y la masa. Además, la tasa de regeneración tiene un impacto en el consumo total de energía. No obstante, el consumo real está altamente asociado con el clima local y el comportamiento del conductor (aspectos que se explicarán posteriormente).

Otros componentes auxiliares pueden incluirse como: iluminación del vehículo, radio, sistema de navegación y calefacción, relacionados con la comodidad del ocupante del VE y que no se relacionan con la propulsión del vehículo. Estos sistemas son alimentados por una batería de 12 voltios, misma que, está conectada a la batería de tracción. Sin embargo, la influencia sobre el consumo es baja (Duce, 2013).

Otros factores relacionados con el vehículo son la eficiencia de la transmisión y del motor. También incluyen la masa del vehículo, la resistencia aerodinámica y la resistencia a la rodadura atribuido al diseño y presión de los neumáticos.

3.6.1.1 Estado de carga de la batería (SOC)

En vehículos con MCI, el primer galón de combustible tiene las mismas propiedades que el último. No obstante, en los VE la “calidad” de los kilovatios hora dependen del SOC. La eficiencia disminuye con el SOC y la vida útil de la batería depende de la estrategia de carga. El frenado regenerativo aumenta la eficiencia, pero reduce la duración de la batería (De Santiago et al., 2012)

Como se mencionó en el capítulo 2, el SOC es una magnitud muy difícil de medir y estimar. No obstante, una de las formas para calcular este valor se expresa en la Ecuación 3.1 que se muestra a continuación:

$$SOC_v = \frac{V_a - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad [3.1]$$

Donde:

SOC_v = Estado de carga de la batería en función del voltaje

V_a = Voltaje actual de la batería

V_{min} = Voltaje mínimo de operación de la batería

V_{max} = Voltaje máximo de operación de la batería

Es necesario aclarar que, este valor del SOC no es el real y es el mismo que se muestra en el escáner automotriz como dato. Esto quiere decir que, aunque se llegue a un 0% de carga, el SOC verdadero presenta ciertas tolerancias con el fin de evitar tanto la sobre descarga como la sobrecarga según se observa en la Figura 3.14.

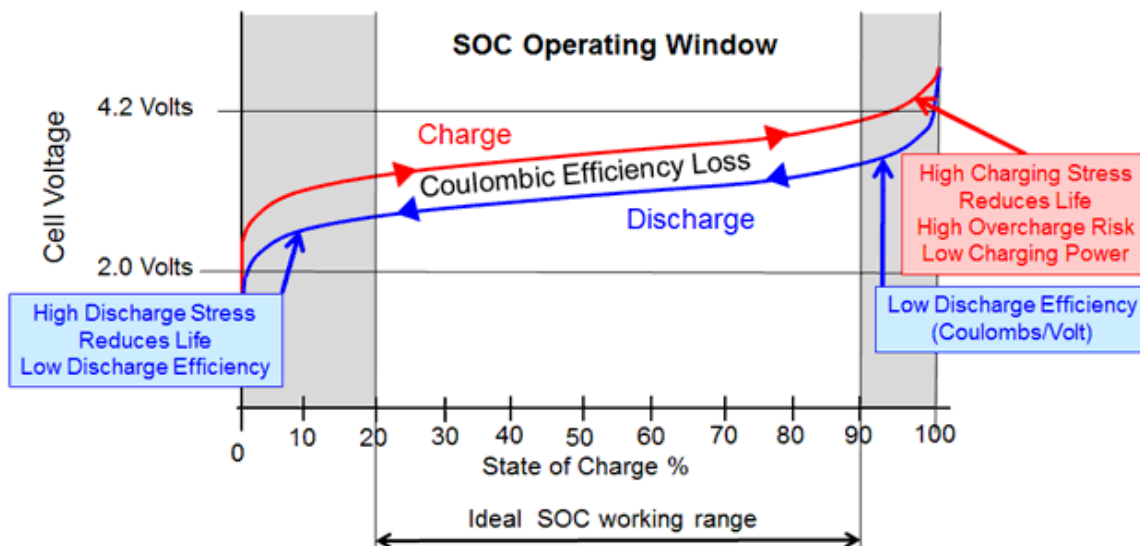


Figura 3.14 Rango ideal de trabajo de una batería de ión-litio en función del SOC

(Electropaedia, n.d.)

3.6.1.2 Resistencia aerodinámica

Este factor depende principalmente de la velocidad del vehículo y del viento, así como también de la forma geométrica del vehículo, como se observó en el Capítulo II. El área transversal efectiva es un dato que no proporciona directamente el fabricante, por lo que se recurrió a su cálculo mediante el uso del software AutoCad. Para esto, se usó un modelo a escala (vista frontal) del Renault Twizy, y con el comando “área” se obtuvo un número aproximado del área efectiva.

3.6.2 FACTORES AMBIENTALES NATURALES

Los factores ambientales incluyen la topografía de una región, la zona climática, el tiempo e innumerables variables más. La topografía puede ser caracterizada por distintos parámetros, por ejemplo, el gradiente de carretera y el ascenso o descenso total en metros. En general, cuanto mayor sea la variación de la altitud, mayor es el consumo debido a la necesidad de superar las diferentes fuerzas que actúan sobre el vehículo (K. Young et al., 2013).

3.6.2.1 Gradiente de carretera

La pendiente de una carretera o camino está determinada por la relación que existe entre la altura superada y la longitud recorrida que puede expresarse en grados. Este gradiente de carretera influye directamente en la potencia requerida por el VE para su desplazamiento, por ende, también incide en el consumo. En la Figura 3.15 se muestra el gradiente de carretera (α), con respecto a la variación de altura (Δh) y la longitud (d).

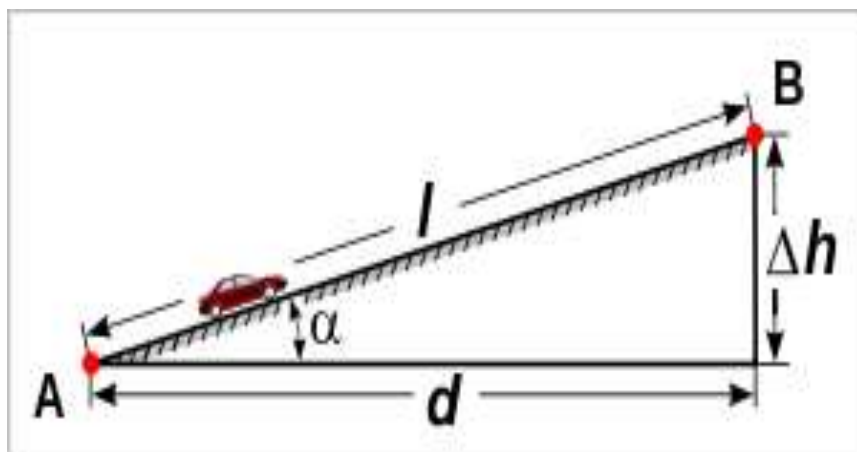


Figura 3.15 Gradiente de carretera (α), variación de altura (Δh), longitud (d) y distancia del recorrido (l)

(J. Ferrer & E.J. Dominguez, 2016, pág. 15)

Para determinar el gradiente de carretera se usó la Ecuación 3.2, los datos de coordenadas del GPS datalogger y la herramienta online GPS Visualizer, que se utilizó para obtener un perfil de alturas con mayor precisión (Del Valle et al., 2018).

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta h}{d} \quad [3.2]$$

Donde:

α : Gradiente de carretera

Δh : Variación de altura [m]

d : Longitud [m]

Posteriormente, al formarse un triángulo rectángulo, para el cálculo de la longitud (d), se utilizó la Ecuación 3.3 puesto que con el perfil de elevación se tiene la distancia del recorrido (l) y la variación de altura (Δh).

$$d = \sqrt{l^2 - \Delta h^2} \quad [3.3]$$

Donde:

d : Longitud [m]

l : Distancia de recorrido [m]

Δh : Variación de altura [m]

3.6.2.2 Temperatura ambiente

Este factor es de gran importancia debido a su incidencia en el rendimiento general de los VE. La disminución de la temperatura ambiente exterior por debajo de los 10°C conlleva a un mayor consumo de energía del VE y a una menor eficiencia del sistema de frenado regenerativo, por ende, ocasiona una disminución en la eficiencia global del VE (Al-Wreikat et al., 2022).

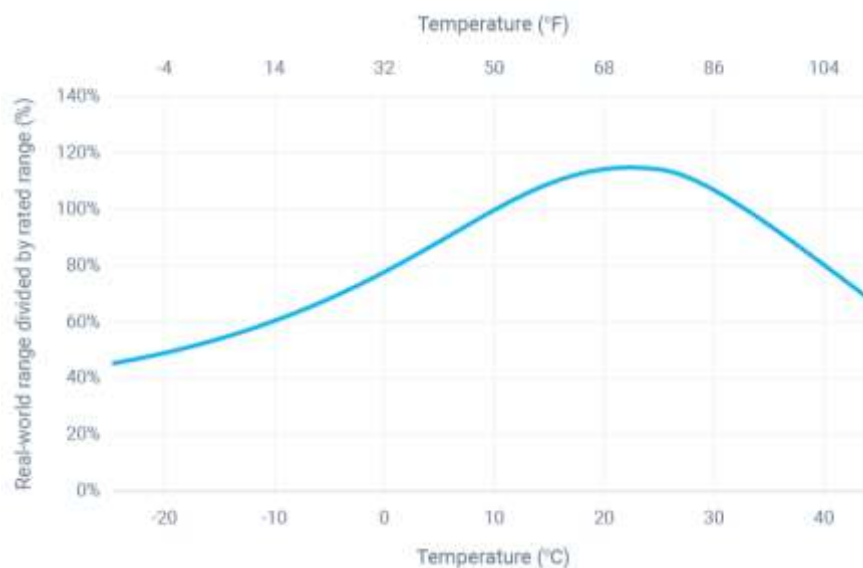


Figura 3.16 Curva de autonomía en función de la temperatura
(Charlotte Argue, 2020)

Como se puede apreciar en la Figura 3.16 los VE presentan una mayor eficiencia cuando operan en rangos de temperatura exterior comprendidos entre 10° C y 30° C, por lo tanto, al circular en zonas climáticas con estas condiciones se puede conseguir un óptimo aprovechamiento de la energía acumulada.

Dado que el estudio fue realizado en la ciudad de Ibarra, que presenta un clima seco templado con variaciones de temperatura que van desde los 13°C a 24°C en el año (Dirección de planificación y desarrollo territorial, 2020, pág. 23), no será un factor de alta incidencia en la eficiencia del VE.

3.6.3 FACTORES DE CONDUCCIÓN

El conductor puede ser caracterizado por su agresividad, es decir, se ilustra con los patrones de aceleración y desaceleración. Cuanto mayor es el índice de agresividad en el estilo de conducción, mayor es la variación en la aceleración, desaceleración y velocidad media. Este comportamiento genera un aumento en el consumo (Badin et al., 2013). El comportamiento de conducción es atribuible a varias características del conductor: edad, género, experiencia de conducción, etc.

3.6.4 FACTORES DEL ENTORNO ARTIFICIAL

El entorno artificial está relacionado con las condiciones de la carretera, intersecciones, tráfico, semáforos y nivel de urbanización. El tráfico se puede caracterizar por la cantidad de congestiones, su caudal y velocidad media. Cuanto mayor sea el nivel de congestión, más se tiene que desacelerar y acelerar el vehículo debido a varias paradas, por lo tanto, el consumo aumenta.

El nivel de urbanización se caracteriza por su densidad de población. Las áreas urbanas suelen presentar un alto número de intersecciones, semáforos y paradas forzadas, velocidad media baja en horas pico, etc.

3.7 ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL RENAULT TWIZY

Como se observa en la figura 2.10, cada elemento del VE tiene su eficiencia basada en la entrada y en la salida de energía. Para el propósito de la investigación se calculó la eficiencia únicamente

durante la etapa 2 o del tanque a la rueda (TtW, por sus siglas en inglés). Dicha eficiencia se puede calcular multiplicando las eficiencias de todos los tramos individuales (Husain, 2021), expresado mediante la Ecuación 3.4.

$$\eta_{VE} = \eta_{descarga,BAT} \cdot \eta_{ME} \cdot \eta_T \cdot G_{reg} \quad [3.4]$$

Donde:

η_{VE} = Eficiencia del vehículo eléctrico

$\eta_{descarga,BAT}$ = Eficiencia de descarga de la batería

η_{ME} = Eficiencia de la electrónica de potencia (inversor, motor eléctrico)

η_T = Eficiencia de la transmisión

G_{reg} = Ganancia por frenado regenerativo

Los datos obtenidos por los equipos de medición expuestos en el apartado 3.3 permitieron el cálculo de la eficiencia del inversor como un dato individual.

3.7.1 EFICIENCIA DE CARGA/DESCARGA DE LA BATERÍA

Según López Martínez (2016): “El rendimiento de la batería durante la carga o descarga se puede definir en cualquier punto de funcionamiento como la relación entre la tensión de operación y la tensión en circuito abierto” (p.27). Dicha relación se expresa mediante las Ecuaciones 3.5 y 3.6.

- Durante la descarga

$$\eta_{descarga,BAT} = \frac{V}{V_0} \quad [3.5]$$

- Durante la carga

$$\eta_{carga,BAT} = \frac{V_0}{V} \quad [3.6]$$

La tensión en circuito abierto V_0 , puede entenderse como el voltaje que tiene la batería sin estar sometida a ninguna carga, mientras que V , es el voltaje de funcionamiento. Esto se ve reflejado

de mejor manera en términos de resistencia interna por medio del circuito equivalente de la batería, mostrado en la Figura 3.17.

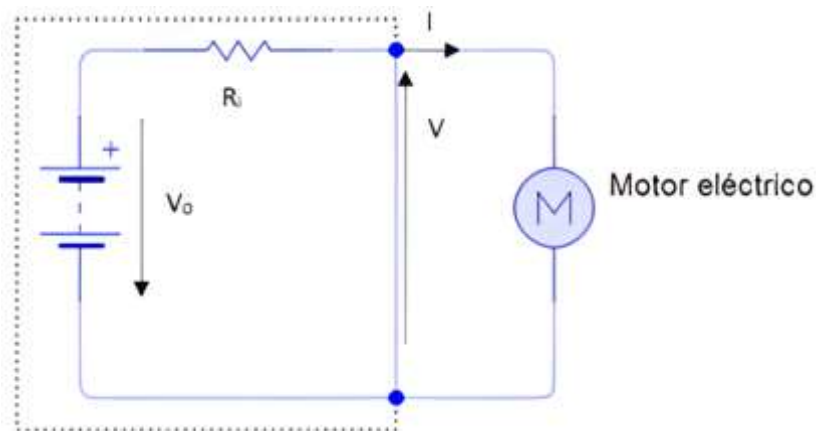


Figura 3.17 Circuito equivalente de la batería

La tensión en bornes V varía del voltaje en circuito abierto V_0 debido a la caída de tensión producida por R_i . Si se supone que existe una corriente I a la salida de la batería, y aplicando la Ley de Kirchoff, se obtiene la Ecuación 3.7.

$$V = V_0 - IR_i \quad [3.7]$$

Con esta ecuación se puede demostrar que, si no existe una corriente de descarga en la batería, entonces $V = V_0$. Además, se debe tomar en cuenta que la tensión V_0 no es constante, puesto a que, se ve afectada por el estado de carga de la batería y por la temperatura. Si en la Ecuación 3.7 se reemplaza el signo negativo por uno positivo, se estaría calculando la tensión de carga.

Para el cálculo del voltaje en circuito abierto, se suele recurrir a una prueba de descarga de la batería. El V_0 varía en función del SOC, por lo que, al medirlo en varios intervalos del estado de carga, se puede obtener una gráfica en donde se observa la relación no lineal entre estas dos variables. La Figura 3.18 muestra un ejemplo de la variación del V_0 vs el SOC en una batería de ion-litio.

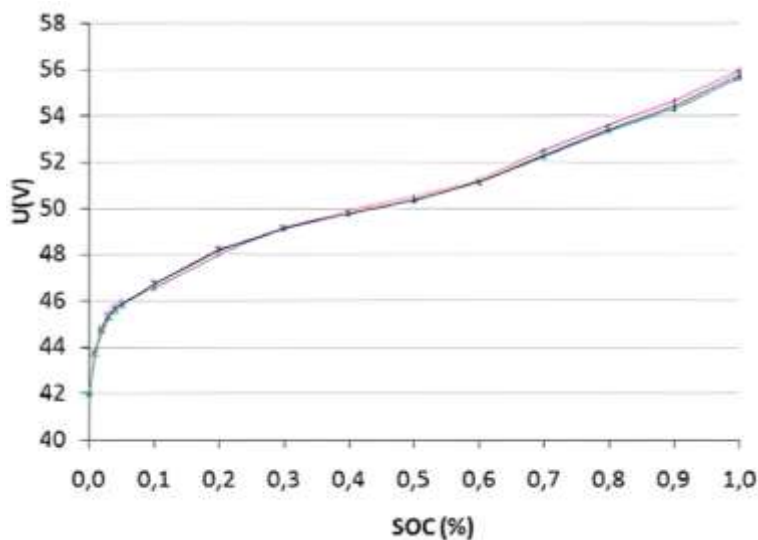


Figura 3.18 Gráfica V_0 vs SOC

(Iglesias et al., 2015, pág. 466)

El V_0 , es un valor difícil de obtener. No obstante, si se tiene el valor de la resistencia interna de la batería, más la Ecuación 3.7, se puede estimar su valor aproximado. En base al valor del V_0 , es posible calcular la eficiencia de carga y descarga de la batería.

De acuerdo con el autor Torres Macció (2018), el valor de la resistencia interna estimada de la batería del Renault Twizy 80 en una simulación realizada en el software AVL Cruise, es de $0,042 \Omega$ durante la carga y $0,031 \Omega$ durante la descarga. Estos valores pueden variar en base al estado de carga, a la temperatura y a la corriente de descarga de la batería. Sin embargo, dichas variaciones son mínimas cuando la batería del VE se encuentra en buen estado. Los estudios demuestran que, mientras más envejece la batería más aumenta su resistencia interna, disminuyendo así su eficiencia y, por consiguiente, su autonomía (Barcellona et al., 2022).

3.7.1.1 Eficiencias en base a cantidad de energía

Otra opción que se consideró si la anterior no daba resultados confiables, fue calcular la eficiencia de carga y descarga en base a la cantidad de energía que posee la batería y la cantidad que sale de ella mediante los datos que ofrece el escáner automotriz Autel MaxiCheck 808. Este equipo tiene la ventaja de mostrar la cantidad de energía que posee la batería a tiempo real en

kWh. Por lo que, para el cálculo de la eficiencia de carga, únicamente se tomó el dato de energía nominal de la batería presente en la Tabla 3.2 y se registró la cantidad de energía de esta luego de una carga completa.

La eficiencia de descarga será entonces la proporción de energía (en kWh) que tiene la batería comparada con la cantidad de energía consumida en base a datos de potencia instantánea, usando las Ecuaciones 3.8 y 3.9:

$$P_{descarga,BAT} = V_{descarga} \cdot I \quad [3.8]$$

$$E_{descarga,BAT} = \frac{P_{descarga,BAT}}{3\,600} \quad [3.9]$$

Donde:

$E_{descarga,BAT}$ = Es la energía que tiene la batería en un instante dado.

El valor de 3 600 se origina por la transformación de datos de potencia (kW) en energía (kWh). Por lo tanto, se dividió cada dato individual de potencia para la frecuencia en que se tomó cada dato durante la prueba, (es decir, 1 segundo) de tal forma que su unidad sea el kJ (kilo Joule). De esta manera, el último paso fue realizar la transformación de la unidad mediante la siguiente relación: $1\ Wh = 3\,600\ J$ (Zacua, 2019).

Con estos datos se calculó eficiencias de descarga instantáneas, sin embargo, lo más factible para visualizar en resultados fue calcularla en ciertos tramos o incluso de forma general en cada una de las secciones de ruta.

3.7.2 EFICIENCIA DEL INVERSOR Y MOTOR ELÉCTRICO

- **Eficiencia del inversor**

Para el cálculo de la eficiencia del inversor a tiempo real se tomaron los valores de voltaje y amperaje a la salida de la batería de tracción y datos de potencia en la red trifásica de salida del inversor. Para esto, se utilizó la Ecuación 3.10.

$$\eta_{Inv} = \frac{P_{inv,salida}}{P_{inv,entrada}} \quad [3.10]$$

Las potencias de entrada y salida se calcularon multiplicando el voltaje por la intensidad de cada tramo. Además, los valores de potencia fueron transformados a cantidades de energía en Wh, para su mejor cuantificación y posterior análisis.

- **Eficiencia del motor eléctrico**

Para este cálculo, no fue necesario determinar la potencia de entrada del motor, puesto que, es la misma que la potencia de salida del inversor, despreciando pérdidas por el cableado. Para determinar la potencia de salida del motor eléctrico, se usaron fórmulas de dinámica vehicular además del valor constante de eficiencia de la transmisión que el fabricante del Renault Twizy provee en la Tabla 3.2. La Ecuación 2.11 que se encuentra en el Capítulo II del presente trabajo se la utilizó con este fin.

No obstante, el motor eléctrico del Renault Twizy tiene una eficiencia aproximada del 83%, cuando funciona cerca de las 2 000 rpm, con un par de 57 Nm y una potencia de 12 kW (Egaña et al., 2016, pág. 11). Sin embargo, este valor posee elevadas variaciones y se lo expresa en función de un mapa de eficiencias obtenidas de forma experimental. La Figura 3.19 muestra el mapa de eficiencias específico para el Renault Twizy. Como se observa, la eficiencia del ME puede alcanzar valores superiores al 90% con velocidades iguales o mayores a 3 500 rpm, representando un alto impacto en la eficiencia general del VE. Todos estos datos fueron usados para validar los resultados obtenidos durante la prueba experimental.

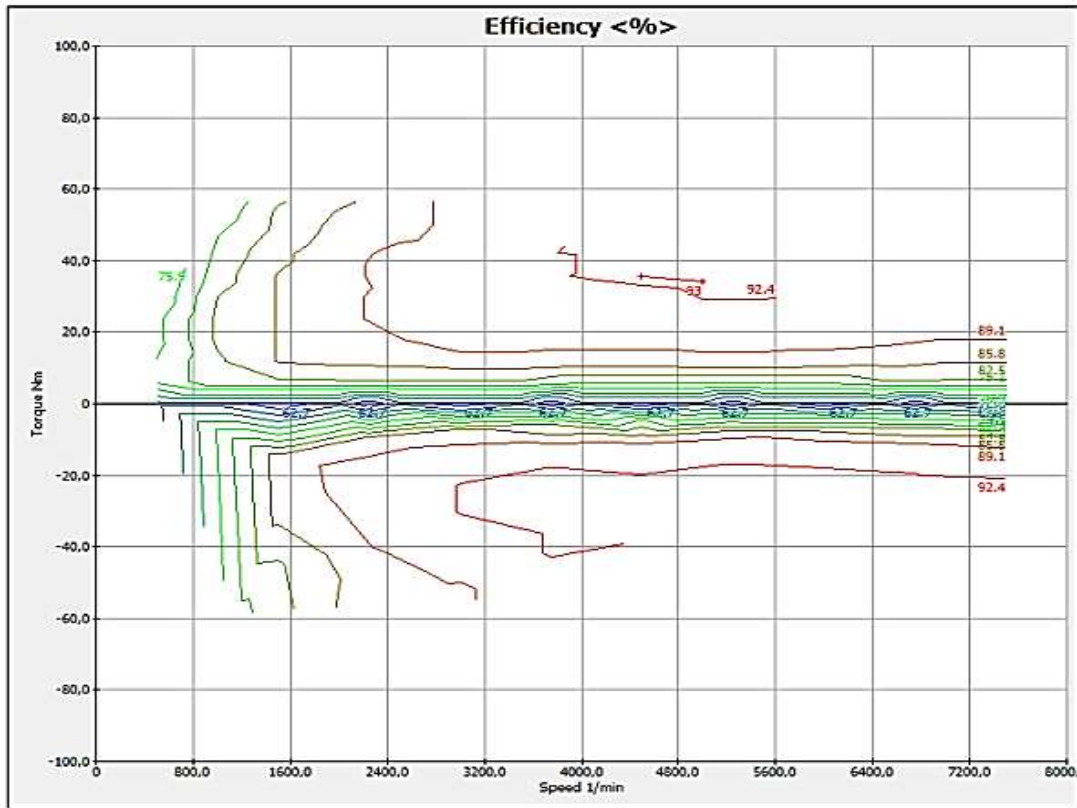


Figura 3.19 Mapa de eficiencias del ME del Renault Twizy

(Torres Macció, 2018, pág. 33)

3.7.3 POTENCIA DE TRACCIÓN

Para un determinado ciclo de conducción la fuerza de tracción puede ser calculada con la Ecuación 3.11.

$$F_{tra} = ma = mgC_r \cos\theta + \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 + m\gamma_m \frac{dv}{dt} \quad [3.11]$$

Como se observa, los tres elementos de esta ecuación son la resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica y la fuerza producida por la aceleración, mismos que ya se habían mencionado en el Capítulo II. El factor de masa equivalente γ_m puede ser estimado mediante la Ecuación 3.12.

$$\gamma_m = 1,04 + 0,0025\xi_j^2\xi_d^2 \quad [3.12]$$

Los valores ξ_j y ξ_d se refieren a la relación de transmisión de la caja y la relación de transmisión final al eje de las ruedas respectivamente. En el Renault Twizy, existe una sola relación de transmisión mostrada en la Tabla 3.2 y se usó para el cálculo de la fuerza de tracción instantánea durante la prueba en ruta. Para obtener la potencia de tracción, únicamente se utilizó la Ecuación 2.10 (Lopez Martinez, 2015) & (Wassiliadis et al., 2022).

3.7.4 ENERGÍA DE REGENERACIÓN

Para el cálculo de esta energía, se consideró aquellos intervalos de potencia de tracción en los que la aceleración era menor a 0, es decir, se realizó el cálculo de la energía total de frenado mediante la Ecuación 3.13

$$E_{frenado} = \int_{a < 0} P_{tracción}(t) dt \quad [3.13]$$

No hubo la necesidad de calcular mediante ecuaciones la cantidad de energía que ingresa a la batería, debido a que los datos del escáner automotriz mostraban directamente valores de corriente negativos en cada intervalo de desaceleraciones. Por lo tanto, se calcularon potencias instantáneas durante dichos intervalos y se obtuvo la energía de regeneración. Además, la ganancia por frenada regenerativa G_{reg} , que fue vital para determinar la eficiencia total del vehículo, fue estimada en base a la relación entre el consumo total de la batería (sin valores de energía con corrientes negativas) vs la energía de regeneración (valores de energía con corrientes negativas). Al ser un valor de ganancia, el porcentaje obtenido debe estar por encima de la unidad (valores iguales o mayores a 1) tal y como se observa en el ejemplo de la Tabla 2.6.

3.8 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL VE CON DISTINTOS COEFICIENTES DE RODADURA

Uno de los parámetros que más se relaciona con la variación del coeficiente de rodadura es el tipo de calzada por la que circula el VE. En el caso de la ruta seleccionada existen vías de asfalto y de hormigón, que suelen presentar irregularidades (baches y fisuras) sobre todo en las zonas urbana y rural. Cuando la superficie de contacto es dura, lisa y seca el valor de resistencia a la rodadura es mínimo, mientras que en caminos desgastados dicho valor incluso puede llegar a

duplicarse. En la Tabla 3.8 se muestran valores típicos del coeficiente de rodadura en función del tipo de calzada.

Tabla 3.8 Valores típicos de coeficiente de rodadura en función del tipo de calzada

Tipo de calzada	Coefficiente de rodadura
Asfalto	0,01
Hormigón	0,015
Camino de tierra	0,05
Camino de arena	0,15

Fuente: (Morales, 2017, pág. 21)

Para el cálculo de la eficiencia del VE Renault Twizy se utilizaron los coeficientes de rodadura para asfalto y hormigón. El valor usado fue determinado en función de la superficie transitada, por lo que, fue necesario visualizar en Google Earth las coordenadas obtenidas con el GPS datalogger y ubicar los tramos correspondientes a cada tipo de suelo. Además, se realizó un análisis sustituyendo los valores sugeridos de coeficiente de rodadura por un valor mínimo de 0,006 y un máximo de 0,015 para evidenciar la influencia de este factor en la eficiencia general del VE.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan la descripción de la ruta de ensayo y los resultados del análisis de los parámetros obtenidos en la prueba experimental, de acuerdo con el siguiente orden:

- (I) Descripción de la ruta de ensayo
- (II) Eficiencia del vehículo: Ruta completa
- (III) Eficiencia del vehículo: Sección Urbana
- (IV) Eficiencia del vehículo: Sección Rural
- (V) Eficiencia del vehículo: Sección Autopista
- (VI) Comparación de resultados entre secciones de ruta
- (VII) Eficiencia del vehículo para distintos coeficientes de rodadura

El procedimiento mostrado anteriormente permitió que el trabajo de grado se lleve a cabo de manera organizada, de tal forma que sea entendible y replicable en posteriores trabajos relacionados con esta temática.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA RUTA DE ENSAYO

La ruta de estudio de los autores (Paillacho & Tequis, 2022), fue seleccionada debido a que ha sido desarrollada específicamente para el Renault Twizy, además de que el punto de partida de la ruta, coincidía con la ubicación del vehículo en el momento de la realización de la prueba. A continuación, se explican las características de la ruta y las secciones que la comprenden.

4.1.1 RUTA COMPLETA

4.1.1.1 Trayectoria de la ruta

En la Figura 4.1 se muestra el total del recorrido que abarca las secciones: urbana, rural y autopista, de tal forma que los puntos inicial y final de la trayectoria sean los mismos. El trayecto inicia en la entrada principal de la Universidad Técnica del Norte, en el sector El Olivo, y recorre gran parte de la ciudad de Ibarra, además de varios tramos de las parroquias de San Antonio y Atuntaqui.

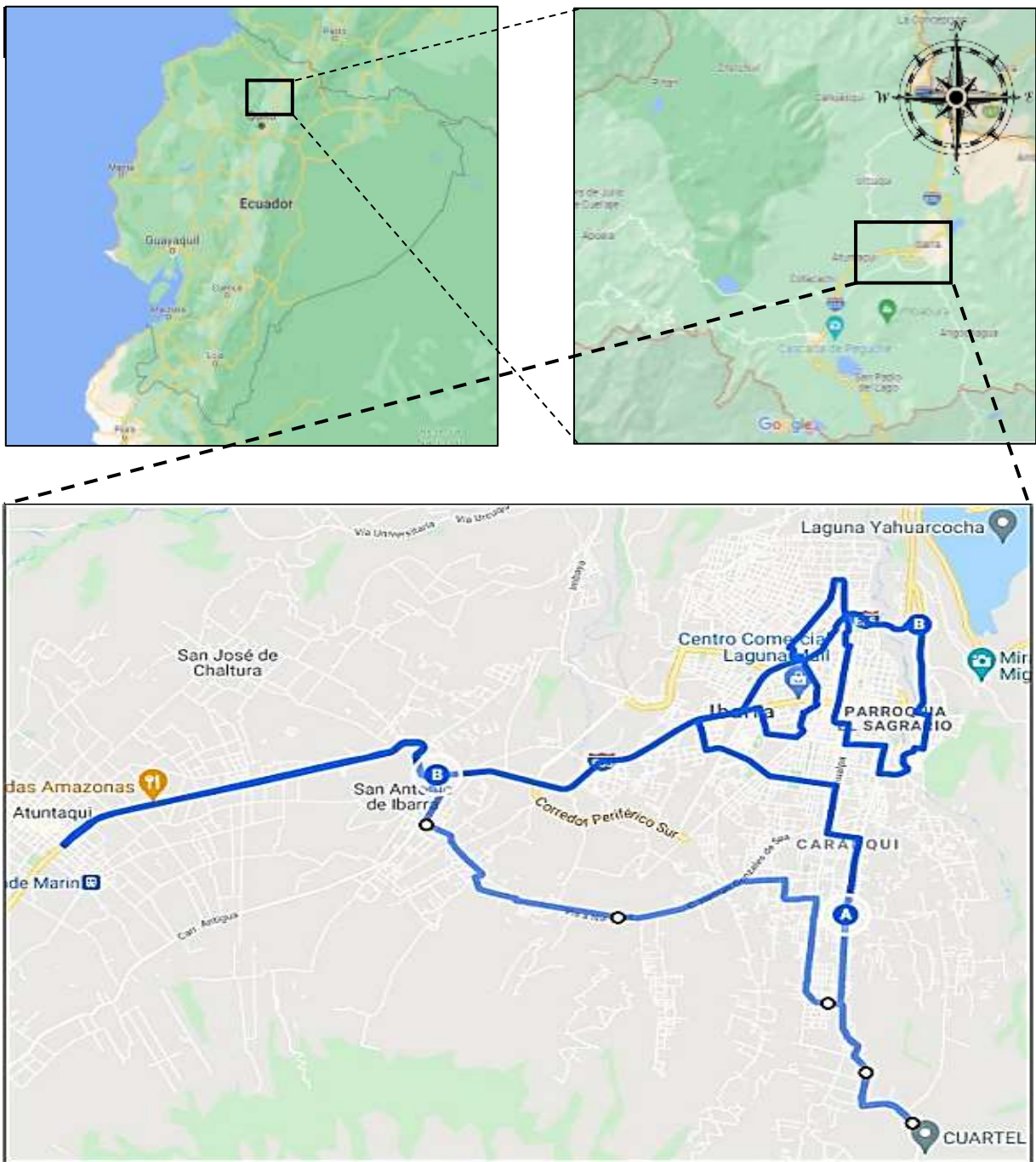


Figura 4.1 Ruta completa de ensayo

(Pailacho & Tequis, 2022)

En la Tabla 4.1 se presenta el inicio y fin de la ruta de ensayo compuesta por los trayectos mostrados anteriormente, además se agrega el orden de recorrido y la distancia total del trayecto.

Tabla 4.1 Trayecto ruta de ensayo

Inicio	Fin	Orden de recorrido de secciones	Longitud (km)
Campus El Olivo UTN, Av. 17 de julio y calle Gral. José María Córdova	Campus El Olivo UTN, Av. 17 de julio y calle Gral. José María Córdova	1. Sección urbana 2. Sección rural 3. Sección autopista	54,9

Fuente: (Paillacho & Tequis, 2022)

4.1.1.2 Características cinemáticas y de altitud

Al final de la prueba experimental se obtuvieron 7 690 valores registrados a 1 Hz, correspondientes al ciclo de conducción de la ruta de ensayo. En la Tabla 4.2 se muestran los diferentes parámetros que componen el ciclo de conducción de la ruta completa.

Tabla 4.2 Características ruta completa

Parámetro	Valor
Tiempo	7 690 segundos
Velocidad Máxima	81,56 km/h
Velocidad Media	24,93 km/h
Distancia	54 400 m
Porcentaje de aceleraciones	36,69 %
Porcentaje de desaceleraciones	36,09 %
Porcentaje de tiempo inactivo	15,28 %
Porcentaje de permanencia en crucero	11,94 %
Altura Máxima	2 628,5 m s. n. m.
Altura Mínima	2 194,6 m s. n. m.
Altura Promedio	2 295,16 m s. n. m.

Además, en la Figura 4.2 se muestran los perfiles de velocidad y de altitud de la ruta de ensayo.

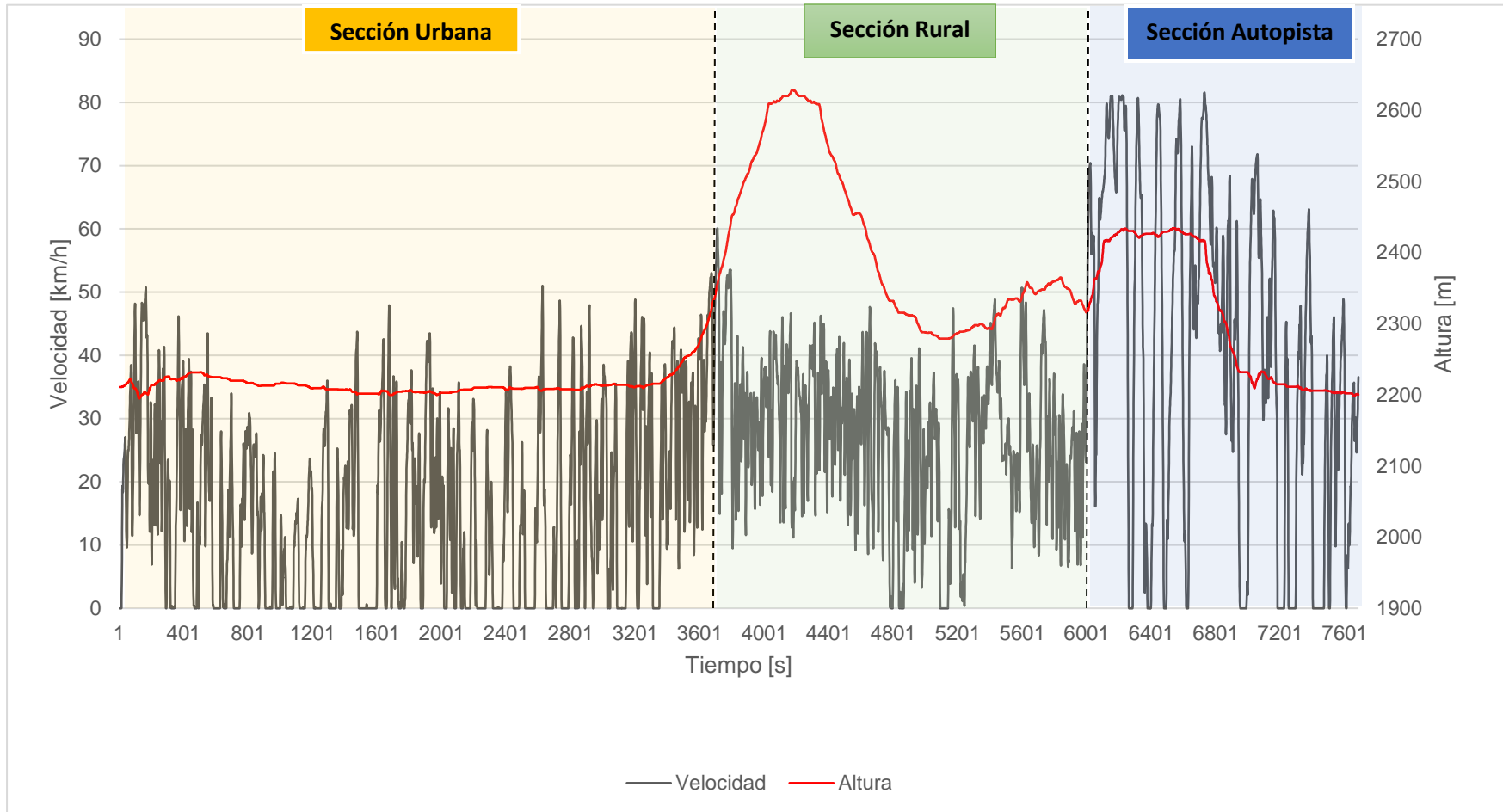


Figura 4.2 Ciclo de conducción de ruta de ensayo

4.1.2 SECCIÓN URBANA

4.1.2.1 Trayectoria de la ruta

En la Figura 4.3 se muestra el trazado completo del recorrido establecido para la sección urbana de la ruta de ensayo, que abarca la zona central de la ciudad de Ibarra, además de sectores como Cruz Verde, Colinas de Ibarra, Pílanquí, Yacucalle y Caranquí. La sección urbana finaliza en la intersección entre la avenida El Retorno y la calle Nazacota Puento.



Figura 4.3 Sección urbana
(Pailacho & Tequis, 2022)

En la Tabla 4.3 se observan los distintos parámetros que componen la sección urbana de la ruta de ensayo como son: origen, destino, calles, avenidas y cruces, así como también se muestra la distancia total de la trayectoria.

Tabla 4.3 Trayecto sección urbana

Inicio	Fin	Calles, avenidas e intersecciones	Longitud (km)
Av. 17 de Julio y calle Gral. José María Córdova	Av. El Retorno y calle Nazacota Puento	Av. 17 de Julio, Av. Padre Aurelio Espinoza Polit, Hugo Guzmán Lara, Alfredo Albuja Galindo, Carlos Barahona, Tahuando, Av. El Retorno, Av. Teodoro Gómez, Simón Bolívar, Obispo Mosquera, Sánchez y Cifuentes, Luis Fernando Villamar, Aurelio Mosquera, Av. Jaime Roldós, Arsenio Torres, Obispo Jesús Yerovi, calle Ibarra, Av. 13 de Abril, Víctor Manuel Guzmán, José Ignacio Burbano, Luis Felipe Borja, Redondel de Ajaví, Jaime Rivadeneira, Alfredo Pérez Guerrero, Darío Egas, Pasquel Monge, Eugenio Espejo, Av. Teodoro Gómez, Av. Heleodoro Ayala, Av. Mariano Acosta, Redondel de la Madre, E35, Guallupe, Manuelita Sáenz, Ricardo Sánchez, Av. Atahualpa, Río Cenepa, Av. El Retorno.	17,3

Fuente: (Paillacho & Tequis, 2022)

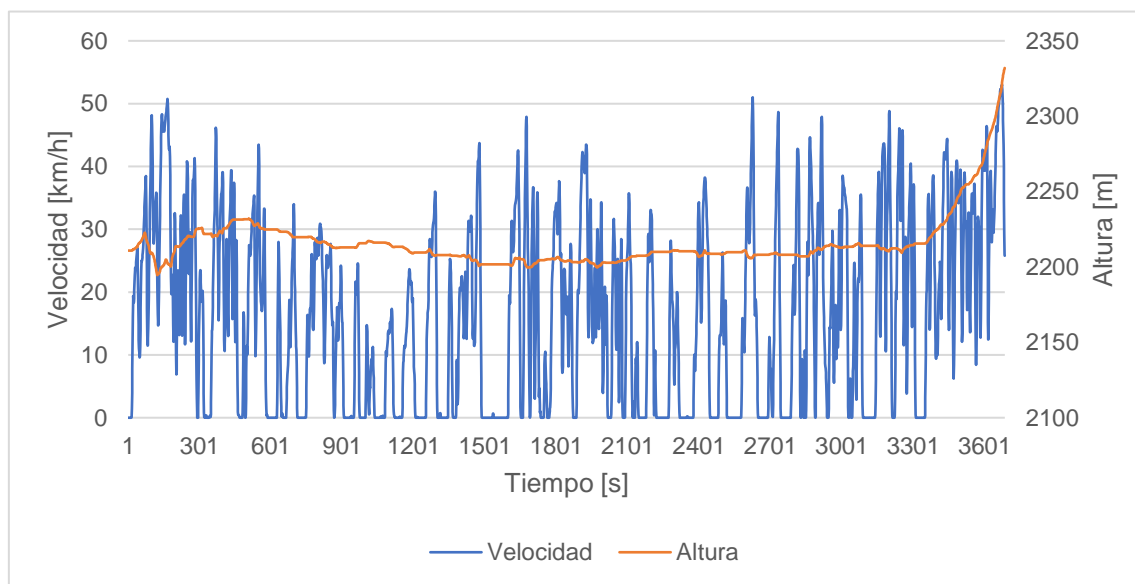
4.1.2.2 Características cinemáticas y de altitud

El recorrido de la sección urbana tuvo una duración de 3 685 segundos. Durante el transcurso, se alcanzó una altura máxima de 2 331,5 m s. n. m., y una altura mínima de 2 194,6 m s. n. m. con una diferencia de 136,9 m. En la Tabla 4.4 se presentan los datos máximos y mínimos, incluyendo los porcentajes correspondientes a la actividad, considerando aceleraciones, desaceleraciones, tiempo inactivo y permanencia en cruce.

Tabla 4.4 Características sección urbana

Parámetro	Valor
Tiempo	3 685 segundos
Velocidad Máxima	53,02 km/h
Velocidad Media	16,3 km/h
Distancia	17 100 m
Porcentaje de aceleraciones	35,90 %
Porcentaje de desaceleraciones	32,14 %
Porcentaje de tiempo inactivo	23,64 %
Porcentaje de permanencia en cruce	8,32 %
Altura Máxima	2 331,5 m s. n. m.
Altura Mínima	2 194,6 m s. n. m.
Altura Promedio	2 215,6 m s. n. m.

La variación de velocidades, así como el perfil de altura de la sección urbana se muestran en la Figura 4.4.

**Figura 4.4** Ciclo de conducción sección urbana

4.1.3 SECCIÓN RURAL

4.1.3.1 Trayectoria de la ruta

La sección rural recorre las parroquias “La Esperanza” y “San Antonio”. La Figura 4.5 muestra la sección rural establecida para llevar a cabo los ensayos, teniendo como inicio el punto final de la sección urbana, y como fin, la intersección entre la vía principal de la Parroquia de San Antonio y la carreteta E35.

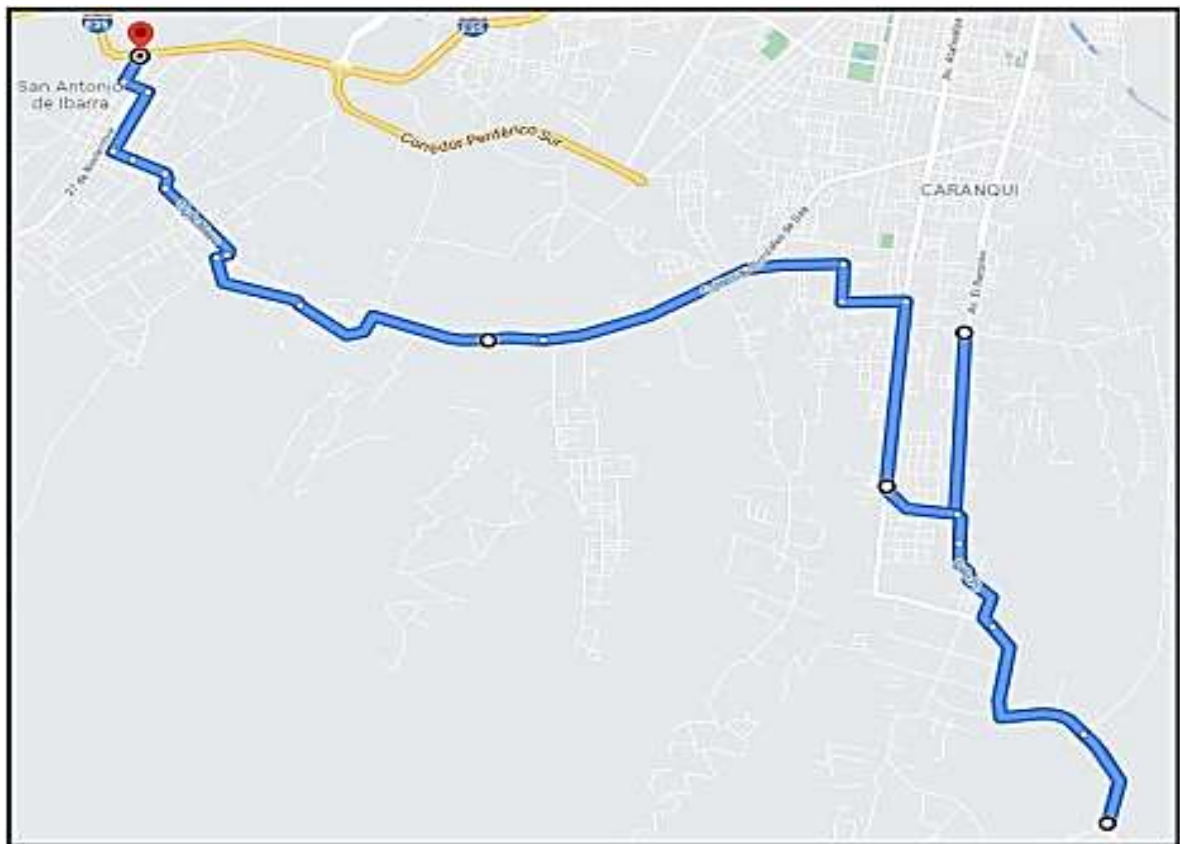


Figura 4.5 Sección rural
(Pailacho & Tequis, 2022)

En la Tabla 4.5 se puede apreciar origen, destino, calles, avenidas y cruces establecidos en la sección rural, así como también la distancia total del trayecto.

Tabla 4.5 Trayecto sección rural

Inicio	Fin	Calles, avenidas e intersecciones	Longitud (km)
Av. El Retorno y calle Nazacota Puento	E35 y calle Antonio José de Sucre	Av. El Retorno, Calle Galo Plaza, Vía a Olmedo, Giro en U en Cuartel Yahuachi y retorno por Vía a Olmedo, Calle Galo Plaza, Av. El Retorno, Av. Atahualpa, Gral. Pintag, Duchicela, Princesa Paccha, Hernán Gonzáles de Saa, Vía Naranjal, 15 de Mayo, Ezequiel Rivadeneira, Simón Bolívar, Camilo Pompeyo, Antonio José de Sucre.	17,6

Fuente: (Paillacho & Tequis, 2022)

4.1.3.2 Características cinemáticas y de altitud

El recorrido de la sección rural tuvo una duración de 2 308 segundos. Durante el transcurso, se alcanzó una altura máxima de 2 628,5 m s. n. m. y una altura mínima de 2 278.9 m s. n. m. con una diferencia de 349.6 m. En la Tabla 4.6 se muestran los datos máximos y mínimos, incluyendo los porcentajes correspondientes a la actividad del VE durante la conducción.

Tabla 4.6 Características sección rural

Parámetro	Valor
Tiempo	2 308 segundos
Velocidad Máxima	60,07 km/h
Velocidad Media	27,52 km/h
Distancia	17 800 m
Porcentaje de aceleraciones	41,69 %
Porcentaje de desaceleraciones	44,55 %
Porcentaje de tiempo inactivo	2,60 %
Porcentaje de permanencia en crucero	11,16 %
Altura Máxima	2 628,5 m s. n. m.
Altura Mínima	2 278,9 m s. n. m.
Altura Promedio	2 408,5 m s. n. m.

Los perfiles de velocidad y de altura de la sección rural se presentan en la Figura 4.6.

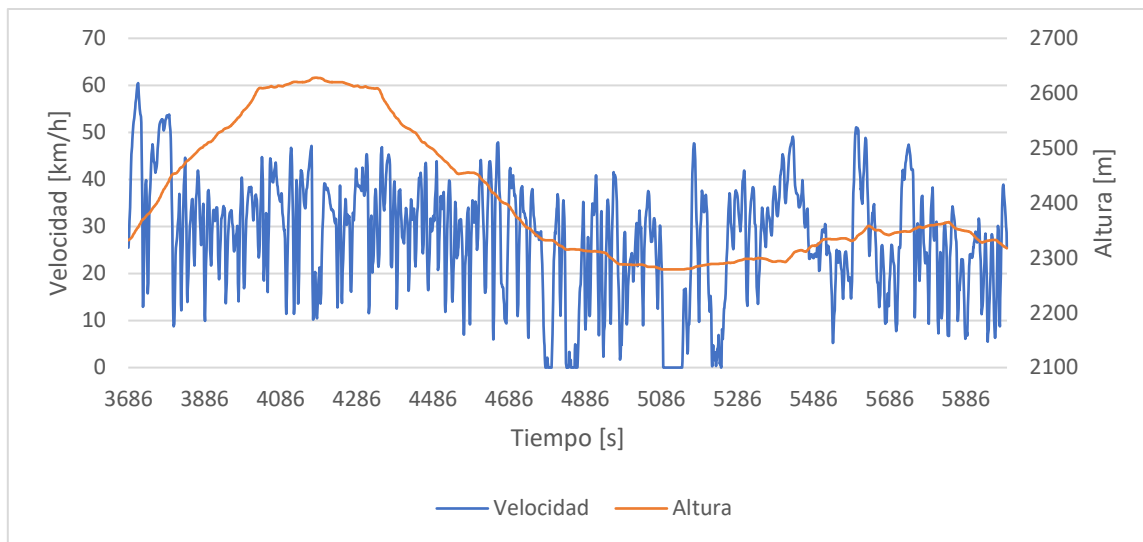


Figura 4.6 Ciclo de conducción sección rural

4.1.4 SECCIÓN AUTOPISTA

4.1.4.1 Trayectoria de la ruta

En la Figura 4.7 se muestra la trayectoria trazada para la sección de autopista, que comprende parte de la carretera panamericana E35, atravesando los sectores de Bellavista, Natabuela y Atuntaqui, hasta el puente a desnivel. El final de la trayectoria se ubica en el punto de inicio de la ruta completa, es decir, en la entrada principal de la Universidad Técnica del Norte.

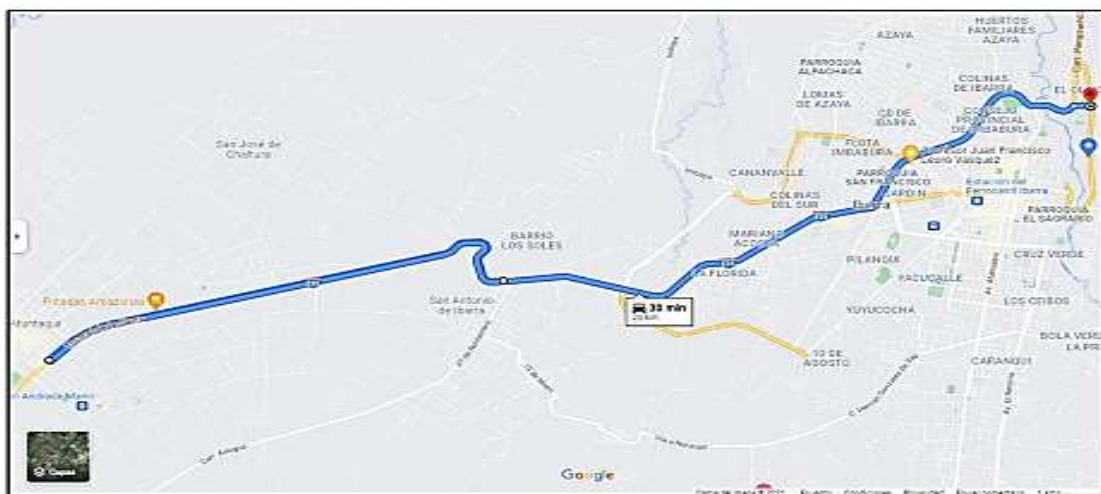


Figura 4.7 Sección autopista
(Pailacho & Tequis, 2022)

La Tabla 4.7 muestra el origen, destino, calles y avenidas comprendidas para la sección de autopista, así como también la distancia total del trayecto.

Tabla 4.7 Trayecto sección de autopista

Orientación	Inicio	Fin	Calles, avenidas e intersecciones	Longitud (km)
N-S	E35 y Calle Antonio José de Sucre-Barrio San Antonio de Ibarra	Hasta puente a desnivel para giro en U de retorno.	E35, puente a desnivel en Parroquia Atuntaqui (E35 y Calle Gral. Enríquez)	20
S-N	Desde puente a desnivel en Parroquia Atuntaqui	Campus de la UTN – El Olivo	E35, Av. Mariano Acosta, Av. Cristóbal de Troya, E35, Calle Dr. Luis Madera, Av. 17 de Julio	

Fuente: (Paillacho & Tequis, 2022)

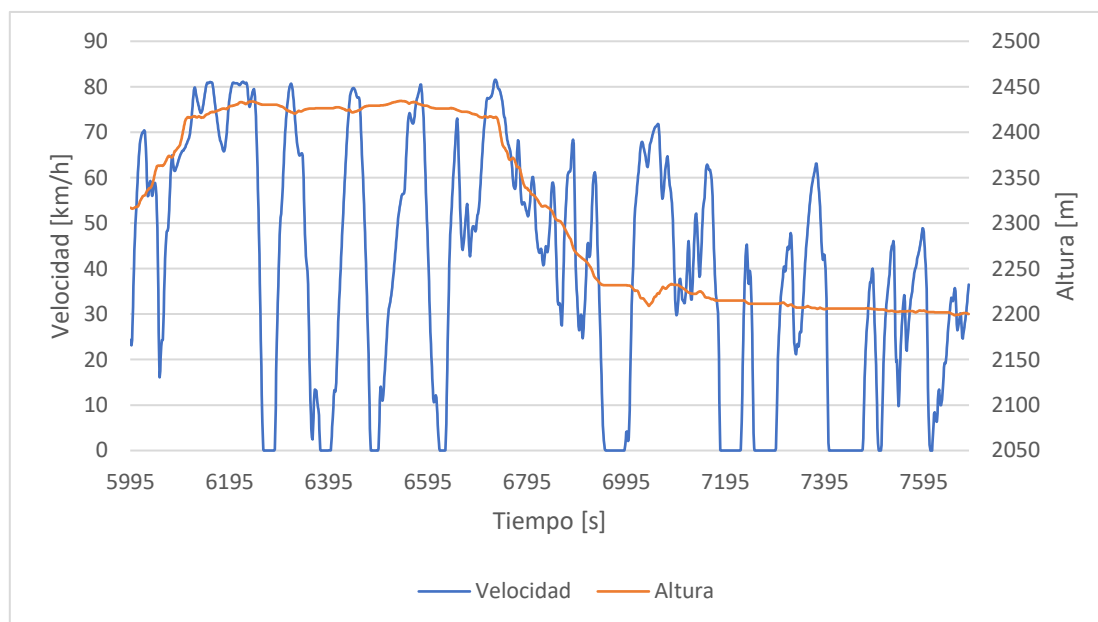
4.1.4.2 Características cinemáticas y de altitud

El trayecto de la sección de autopista tuvo una duración de 1 693 segundos. Durante el recorrido, se alcanzó una altura máxima de 2 434,4 m s.n.m. y una altura mínima de 2 165,9 m s.n.m. con una diferencia de 268,5 m. En la Tabla 4.8 se presentan los datos máximos y mínimos, incluyendo los porcentajes correspondientes a la actividad, considerando aceleraciones, desaceleraciones, tiempo inactivo y permanencia en cruce.

Tabla 4.8 Características sección autopista

Parámetro	Valor
Tiempo	1 693 segundos
Velocidad Máxima	81,56 km/h
Velocidad Media	40,16 km/h
Distancia	19 500 m
Porcentaje de aceleraciones	34,79 %
Porcentaje de desaceleraciones	35,92 %
Porcentaje de tiempo inactivo	14,35 %
Porcentaje de permanencia en crucero	14,94 %
Altura Máxima	2 434,4 m s. n. m.
Altura Mínima	2 165,9 m s. n. m.
Altura Promedio	2 308,2 m s. n. m.

Los perfiles de velocidad y altura obtenidos con la prueba experimental en la sección de autopista se observan en la Figura 4.8.

**Figura 4.8** Ciclo de conducción sección autopista

4.2 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO: RUTA COMPLETA

4.2.1 ESTIMACION DE ENERGÍA CONSUMIDA: TANQUE A LA RUEDA

La distribución del consumo de los elementos del tren motriz del Renault Twizy para la ruta de ensayo se observa en la Figura 4.9 donde se evidencia que las pérdidas de energía desde el banco de baterías hasta la rueda (energía de tracción) son del 25,46% representando una cantidad de 1 441,37 Wh, sin considerar la energía de regeneración que fue de 766,41 Wh.

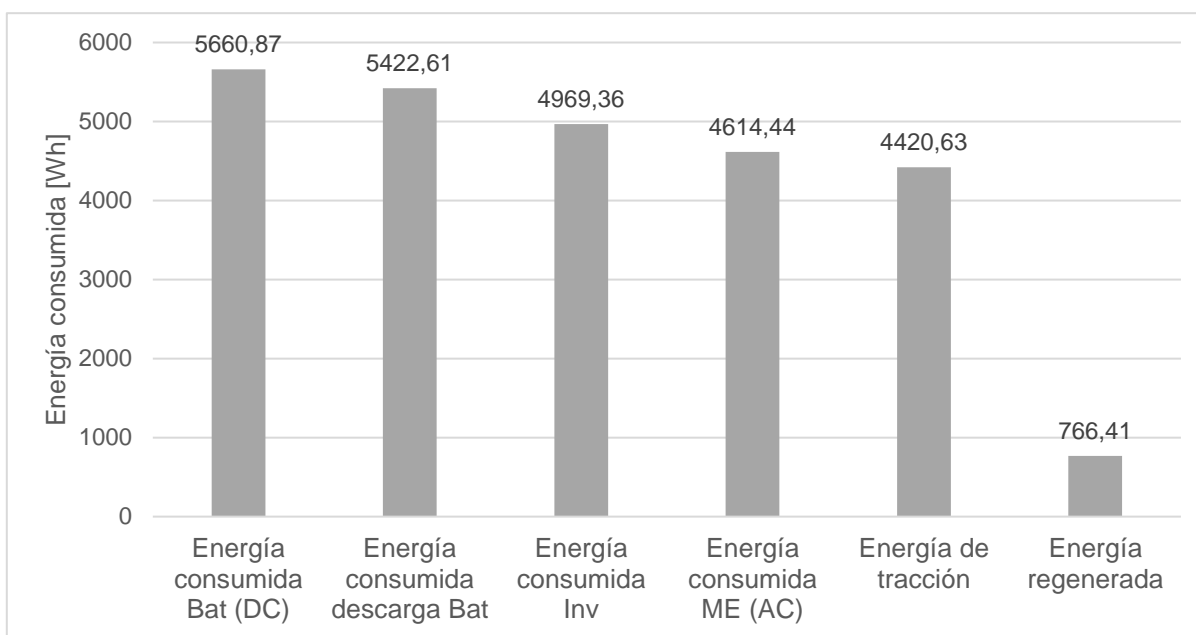


Figura 4.9 Energía consumida del tanque a la rueda en ruta completa

4.2.2 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO Y COMPONENTES

En esta sección, se muestran tanto los consumos como las eficiencias energéticas de cada elemento del tren motriz para la totalidad del recorrido, obtenidas principalmente en base a las ecuaciones de la sección 3.7. Es necesario aclarar que el valor de la eficiencia de la transmisión fue considerado como constante a pesar de que en la realidad es un número variable cuya medición excede los alcances del presente trabajo. Además, en la Tabla 4.9 se presenta el estado de salud de la batería en función de su energía nominal y la energía que se obtuvo tras la

medición realizada con el escáner automotriz, indicando un estado óptimo del funcionamiento del banco de baterías.

Tabla 4.9 Estado de Salud (SOH) del banco de baterías

Parámetro	Cantidad	Unidad	Referencia
Energía total batería	6,1	kWh	Ficha Técnica Renault Twizy
Energía medida al 100% por BMS	5,9	kWh	Medida experimental
SOH	96,72	%	Calculada

De esta forma, se obtuvo una eficiencia global del 85%, con un consumo real de 4 894,46 Wh como se observa en la Tabla 4.10. Además, la energía de regeneración representa un 13,54% de la totalidad de la energía que se consumió durante todo el trayecto. En base al dato de consumo real y el valor presentado en la Tabla 4.9 como energía medida total, se determinó que al final de todo el recorrido, la batería aún conservaba una cantidad de energía de 1 005,54 Wh, lo que representa un porcentaje del SOC real del 17,04%.

Tabla 4.10 Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en ruta completa

RUTA COMPLETA							
Tracción	Cantidad	Unidad	Referencia	Regeneración	Cantidad	Unidad	Referencia
Eficiencia de carga batería	0,97	-	Calculada	Total energía de frenado	-1 769,19	Wh	Calculada
Energía consumida por batería de tracción (DC)	5 660,87	Wh	Calculada	Energía suministrada a motor eléctrico	-1 698,43	Wh	Calculada
Energía consumida por descarga de batería	5 422,61	Wh	Medida	Total energía regenerada por motor eléctrico	-845,46	Wh	Medida
Energía regenerada	-766,41	Wh	Medida	Energía suministrada a batería	-766,41	Wh	Medida
Energía real consumida por descarga batería	4 894,46	Wh	Medida	Eficiencia freno regenerativo	0,43	-	Calculada
Eficiencia de descarga batería	0,96	-	Calculada	Porcentaje de recuperación vs consumo	13,54	%	Calculada
Ganancia por frenada regenerativa	1,14	-	Calculada				
Energía consumida por inversor	4 969,36	Wh	Medida				
Eficiencia inversor	0,92	-	Calculada				
Energía de tracción	4 219,50	Wh	Calculada				
Eficiencia transmisión	0,96	-	Ficha				
Energía consumida por motor eléctrico (AC)	4 404,48	Wh	Calculada				
Eficiencia motor eléctrico	0,89	-	Calculada				
Eficiencia general ruta completa	0,85	-	Calculada				

4.3 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO: SECCIÓN URBANA

4.3.1 ESTIMACIÓN DE ENERGÍA CONSUMIDA: TANQUE A LA RUEDA

La distribución del consumo de los elementos del tren motriz del Renault Twizy para la sección urbana se observa en la Figura 4.10 donde se evidencia que las pérdidas de energía desde el banco de baterías hasta la rueda son del 25,86% lo que representa una cantidad de 509,52 Wh, sin considerar la energía de regeneración, que representa un 10,63% del total de la energía consumida.

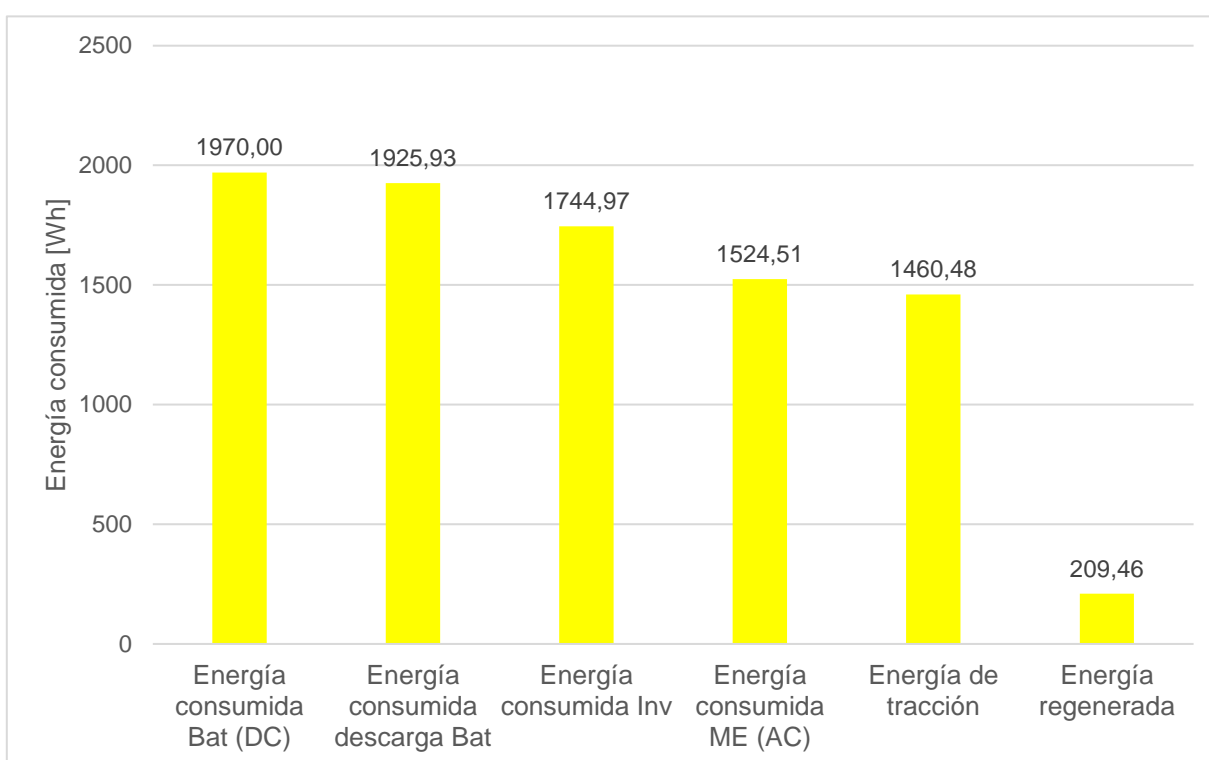


Fig. 4.10 Energía consumida del tanque a la rueda en sección urbana

4.3.2 ANÁLISIS DE ENERGÍA CONSUMIDA: COMPONENTES VS FACTORES

4.3.2.1 Batería e inversor vs velocidad

Se analizó el consumo de energía del banco de baterías y del inversor trifásico con respecto a la velocidad, mostrando en la Figura 4.11 un tramo del total de la sección que abarca desde los 1 000 a los 1 200 segundos.

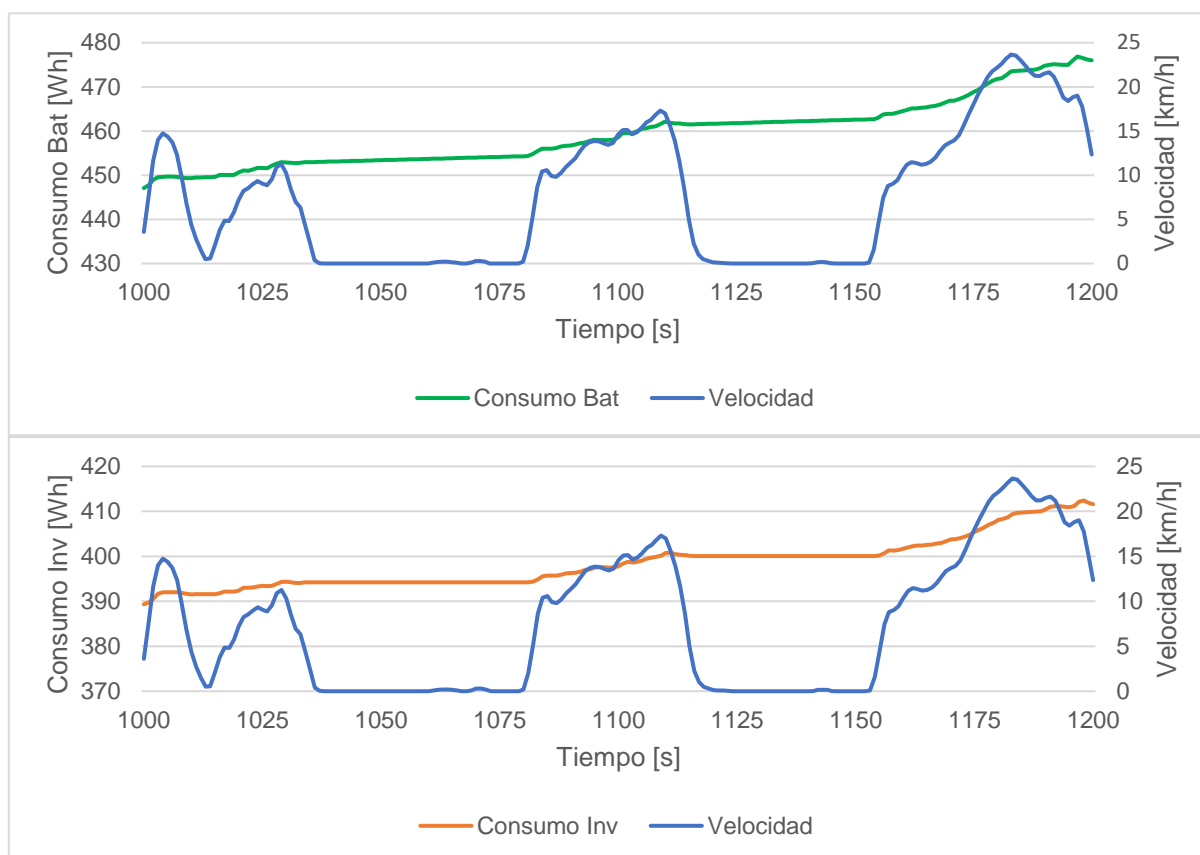


Figura 4.11 Consumo de batería de tracción e inversor trifásico vs velocidad

En este tramo se verifica que el consumo se relaciona directamente con las variaciones de velocidad que van desde los 0 km/h a los 24 km/h. Cuando existen aceleraciones bruscas, como en el caso de los tramos que abarcan los 1 081 a 1 120 y 1 150 a los 1 200 segundos, el consumo tanto del banco de baterías como del inversor aumentan significativamente, con un valor de 10,42 Wh y de 9,01 Wh respectivamente. No obstante, en el lapso que abarca los 1 000 a los 1 038 segundos, se evidencian ligeros incrementos del consumo, concretamente de 6,19 Wh para el banco de baterías y de 4,9 Wh para el inversor, correspondientes a bajas velocidades que no superan los 15 km/h.

4.3.2.2 Batería vs corriente de descarga

A lo largo del trayecto urbano se registró variaciones de la corriente de descarga de la batería de tracción mostrados en la Figura 4.12. En el tramo comprendido desde los 2 750 segundos

hasta el final de la ruta, existen picos máximos de corriente que alcanzan los 260,25 A, generando un incremento en la pendiente de consumo. A su vez, se tiene corrientes de regeneración que alcanzan los -51 A, lo que produce que el consumo tienda a mantenerse constante.

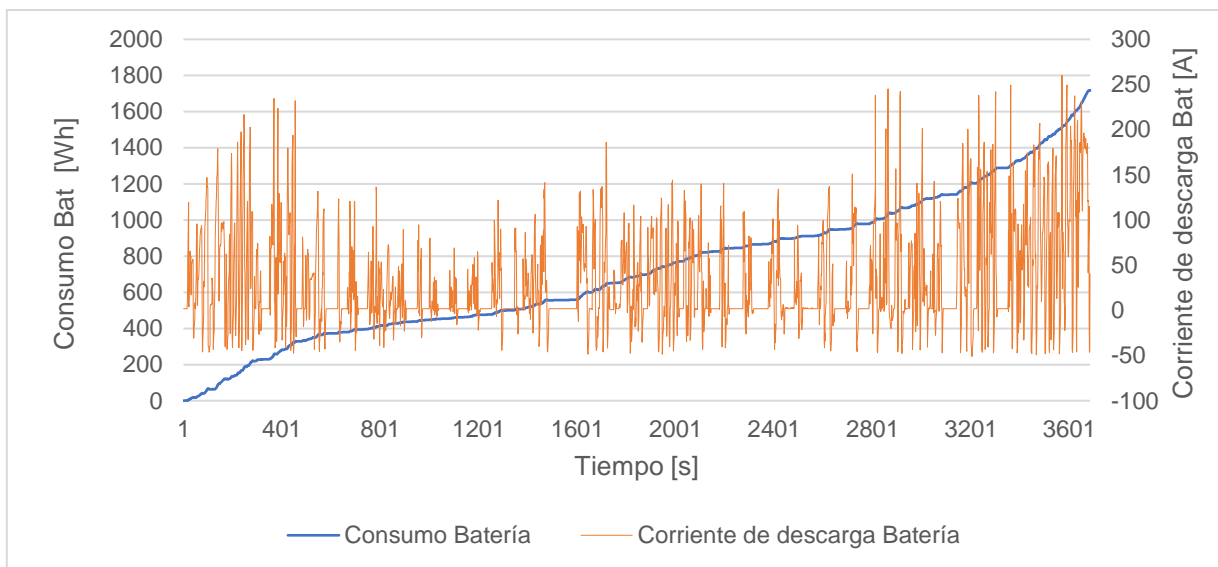


Figura 4.12 Consumo batería vs corriente de descarga

4.3.2.3 SOCv vs altura

Durante el trayecto de la sección urbana se puede determinar que el SOCv presenta variaciones en función de la altimetría, tal y como se observa en la Figura 4.13. En el tramo que va de los 425 a los 1 591 segundos existe una disminución de altura de 26,6 m y una variación mínima del SOCv de 91% a 86%. Esto se debe a la intervención del freno regenerativo durante las pendientes negativas. Por el contrario, en el tramo que va de los 3 393 segundos hasta el final de la ruta se evidencia un incremento de 107,1 m de altura y una reducción del SOCv de 65% al 58%. Se puede denotar que la reducción del estado de carga en los dos tramos seleccionados es muy baja. Sin embargo, el último tramo tiene menor duración y un consumo de energía superior debido al aumento pronunciado de la altura.

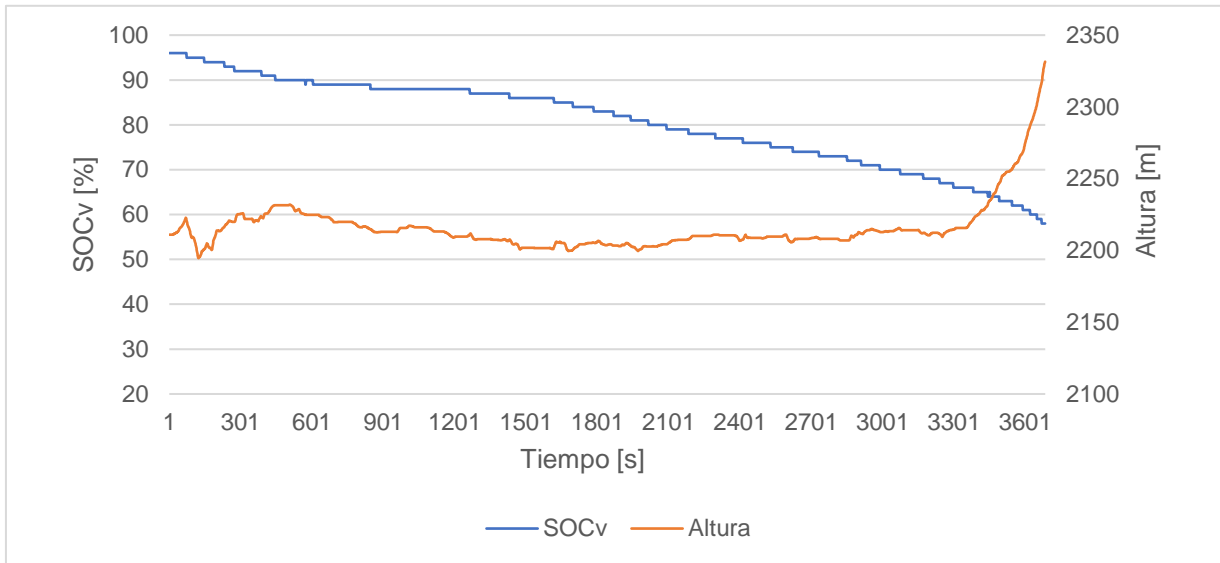


Figura 4.13 SOCv vs altura

4.3.2.4 Elementos del tren motriz vs temperatura de motor eléctrico

La Figura 4.14 muestra el comportamiento de la temperatura del motor eléctrico frente al consumo de los elementos del tren motriz del Renault Twizy. Se evidencia una relación directamente proporcional teniendo variaciones en la temperatura que van desde los 29° C al inicio de la sección, hasta los 90° C en el final de esta. Esto se debe a las constantes aceleraciones donde el VE requiere de un mayor esfuerzo del motor eléctrico y como consecuencia se tiene un elevado consumo de energía.

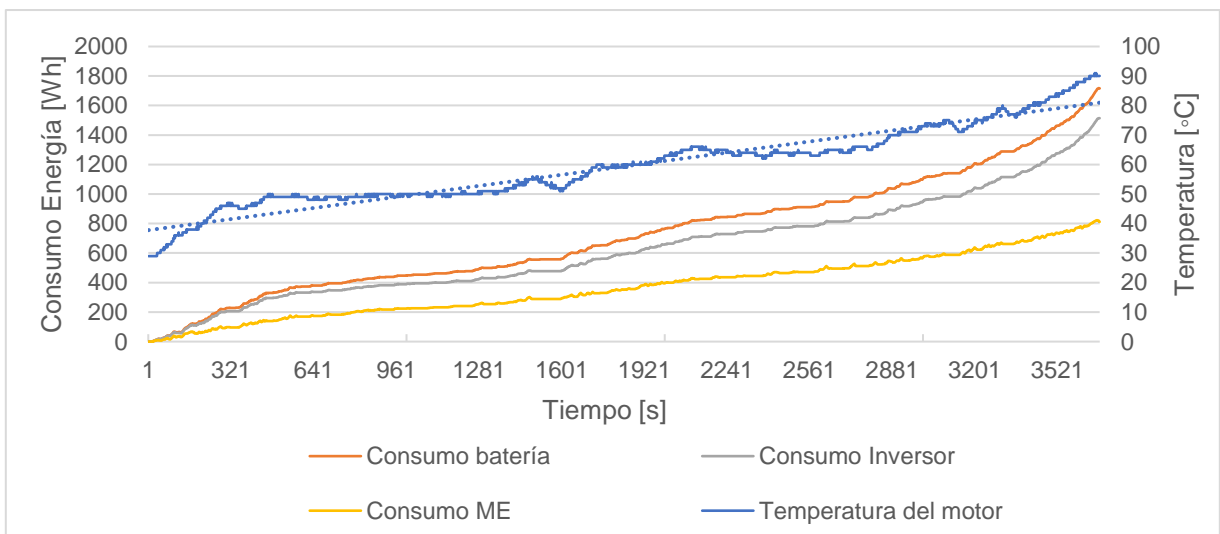


Figura 4.14 Consumo de elementos del tren motriz del VE vs temperatura ME

4.3.2.5 Energía de tracción vs energía de frenado

De acuerdo con el autor (Lopez Martinez, 2015), en un ciclo de conducción urbano FTP75, la energía de frenado puede alcanzar valores por encima del 34% del total de la energía de tracción. En la Figura 4.15, se pueden observar las energías de tracción, de frenado y de regeneración totales de la sección urbana. Como se evidencia, la energía de frenado representa un 47% del total de la energía de tracción y, además, únicamente el 31% del total de la energía de frenado llega al banco de baterías por acción del freno regenerativo.

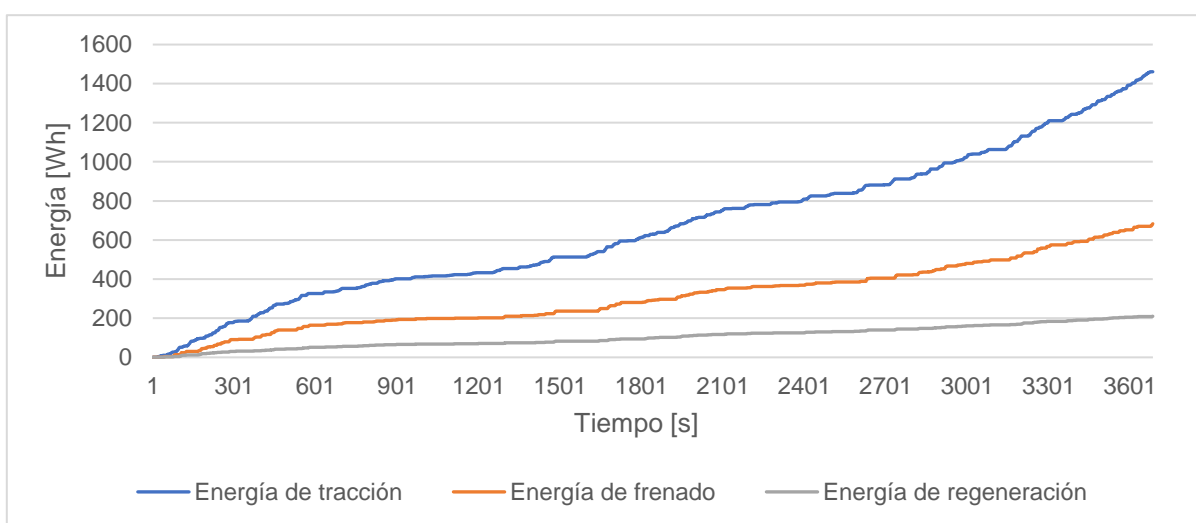


Figura 4.15 Energía de tracción vs energía de frenado vs energía de regeneración

4.3.2.6 Potencias instantáneas de los elementos del tren motriz

En la Figura 4.16 se muestra el comportamiento de las potencias de descarga de la batería, del inversor y de tracción durante el tramo de los 150 segundos a los 300 segundos de la sección urbana. Las potencias de descarga de la batería son siempre mayores que las del resto de elementos, indicándose las pérdidas de energía en cada instante de tiempo. Por otra parte, los picos de valores negativos de la potencia de tracción que alcanzan los -10 kW, representan las potencias de frenado que fueron usadas para la determinación de la energía de frenado, mostrada en la Figura 4.15.

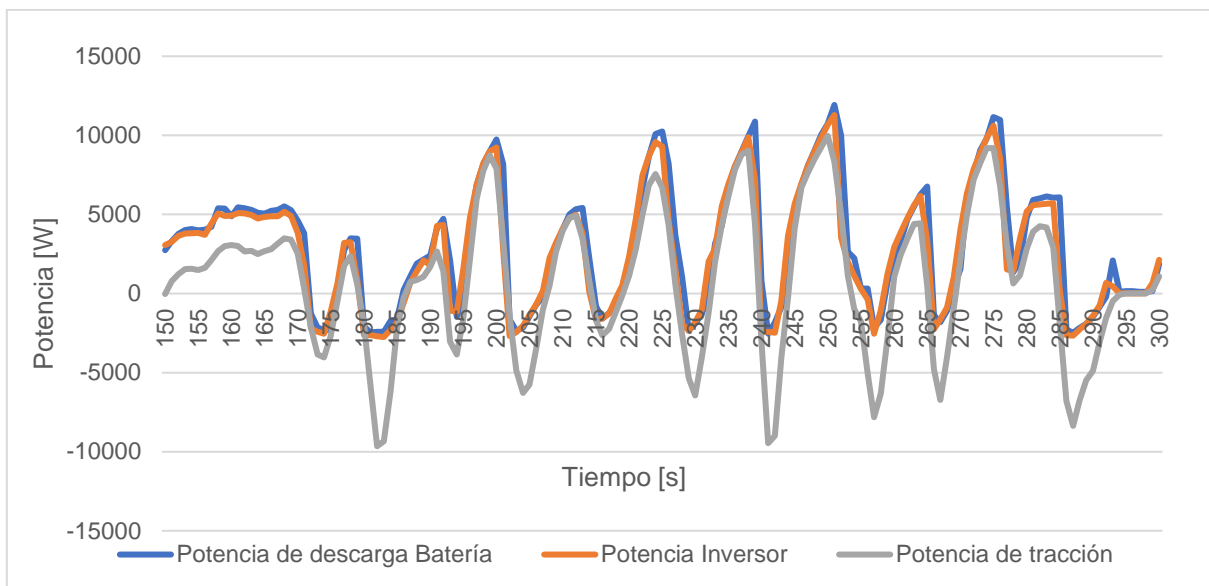


Figura 4.16 Potencias instantáneas de los elementos del tren motriz

4.3.3 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO Y COMPONENTES

Como se observa en la Tabla 4.11, la eficiencia general del Renault Twizy en la sección urbana fue del 82% al considerar las eficiencias individuales de descarga de la batería, del inversor, del motor eléctrico, de la transmisión y de la ganancia por frenada regenerativa, con un consumo de energía real de 1 760,54 Wh. Además, se obtuvo una energía de frenado de 682,54 Wh, de la cual, únicamente se regeneró una cantidad de 209,46 Wh, lo que representa una eficiencia del sistema de freno regenerativo del 31%.

Tabla 4.11 Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en sección urbana

SECCIÓN URBANA							
Tracción	Cantidad	Unidad	Referencia	Regeneración	Cantidad	Unidad	Referencia
Eficiencia de carga batería	0,97	-	Calculada	Total energía de frenado	-682,54	Wh	Calculada
Energía consumida por batería de tracción (DC)	1 970	Wh	Calculada	Energía suministrada a motor eléctrico	-655,24	Wh	Calculada
Energía consumida por descarga de batería	1 925,93	Wh	Medida	Total energía regenerada por motor eléctrico	-235,84	Wh	Medida
Energía regenerada	-209,46	Wh	Medida	Energía suministrada a batería	-209,46	Wh	Medida
Energía real consumida por descarga batería	1 760,54	Wh	Medida	Eficiencia freno regenerativo	0,31	-	Calculada
Eficiencia de descarga batería	0,98	-	Calculada	Porcentaje de recuperación vs consumo	10,63	%	Calculada
Ganancia por frenada regenerativa	1,11	-	Calculada				
Energía consumida por inversor	1 744,97	Wh	Medida				
Eficiencia inversor	0,91	-	Calculada				
Energía de tracción	1 460,48	Wh	Calculada				
Eficiencia transmisión	0,96	-	Ficha				
Energía consumida por motor eléctrico (AC)	1 524,51	Wh	Calculada				
Eficiencia motor eléctrico	0,87	-	Calculada				
Eficiencia general sección urbana	0,82	-	Calculada				

4.4 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO: SECCIÓN RURAL

4.4.1 ESTIMACIÓN DE ENERGÍA CONSUMIDA: TANQUE A LA RUEDA

La distribución del consumo de los elementos del tren motriz del Renault Twizy para la sección rural se muestra en la Figura 4.17. La energía que sale del banco de baterías hasta llegar a la rueda posee pérdidas que alcanzan el 28,18%, es decir, de 548 Wh. No obstante, de esta cantidad se recuperan 355.42 Wh por acción del sistema de freno regenerativo.

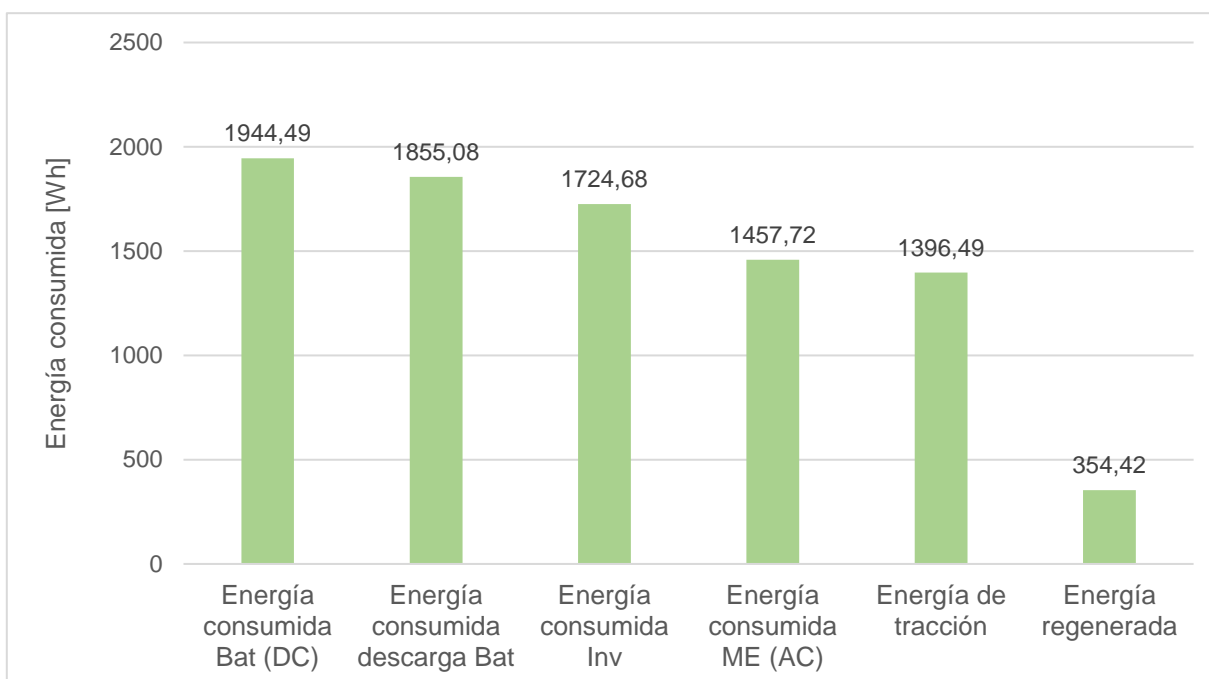


Figura 4.17 Energía consumida del tanque a la rueda en sección rural

4.4.2 ANÁLISIS DE ENERGÍA CONSUMIDA: COMPONENTES VS FACTORES

4.4.2.1 Batería vs velocidad

En la trayectoria rural, los intervalos de consumo y regeneración se evidencian de acuerdo con las variaciones de velocidad. De este modo, la Figura 4.18 muestra un tramo del total del recorrido cuya duración es de 120 segundos, en donde se observa que el incremento de velocidad que va desde los 25 hasta los 60 km/h aumenta el consumo en 250 Wh.

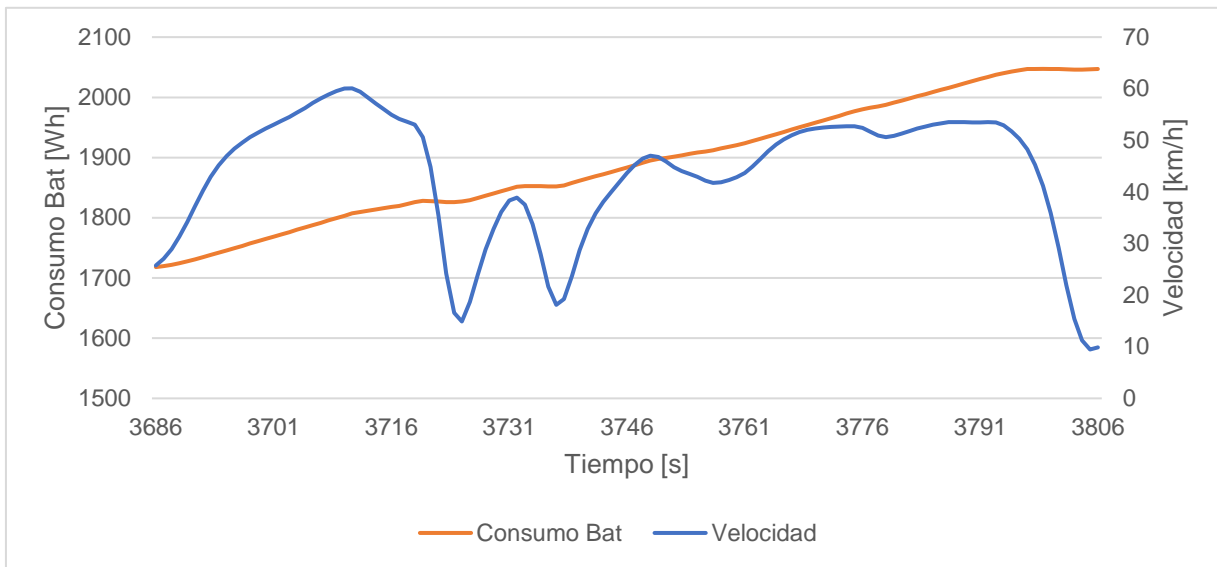


Figura 4.18 Consumo de batería vs velocidad (aceleración)

Por otra parte, en otro tramo comprendido entre los 4 354 hasta los 4 420 segundos del total de la trayectoria indicado en la Figura 4.19, se puede observar lo contrario a la gráfica anterior, denotando variaciones en la velocidad que van desde los 47 hasta los 15 km/h. Asimismo, se evidencia una clara reducción en el consumo debido a las desaceleraciones existentes en este tramo que producen energía de regeneración.

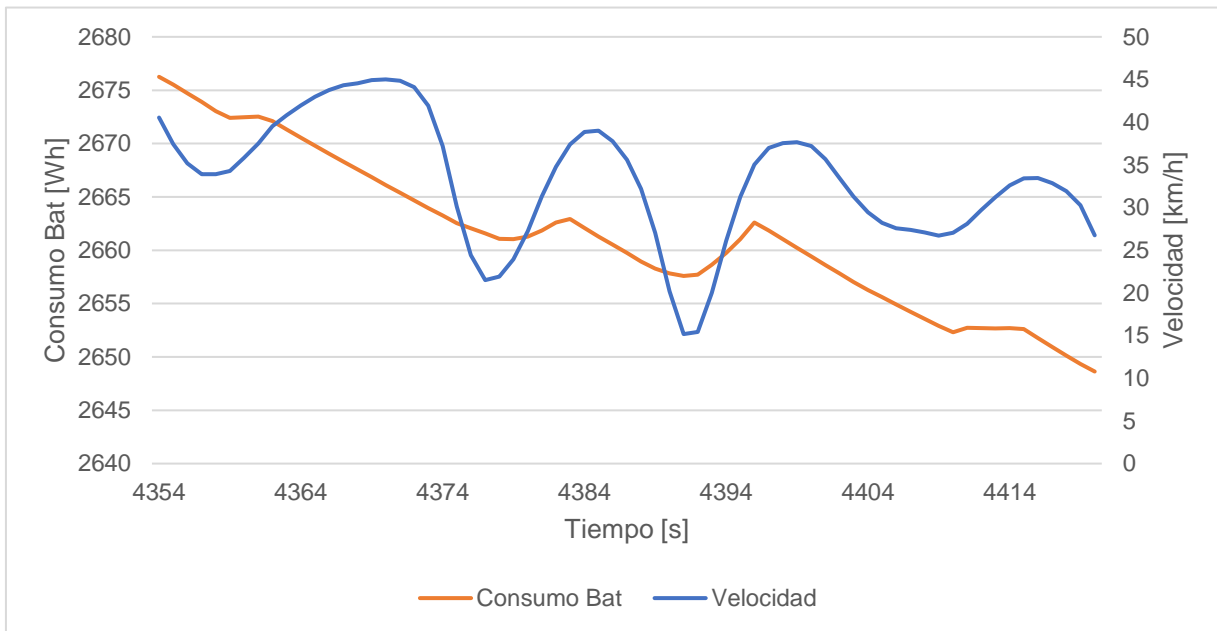


Figura 4.19 Consumo de batería vs velocidad (desaceleración)

4.4.2.2 Batería vs corriente de descarga

En el trayecto rural se visualizó variaciones de la corriente de descarga de la batería de tracción mostrados en la Figura 4.20. En el tramo que abarca los 3 686 hasta los 4 091 segundos, se observan picos máximos de corriente que alcanzan los 271,25 A, provocados por las altas velocidades y el incremento pronunciado de altura tal y como se muestra en la Figura 4.6. Además, se tienen corrientes de regeneración en gran parte del recorrido con valores que alcanzan los -58 A. El tiempo en el que se producen es prolongado, por lo que se evidencian reducciones claras en el consumo.

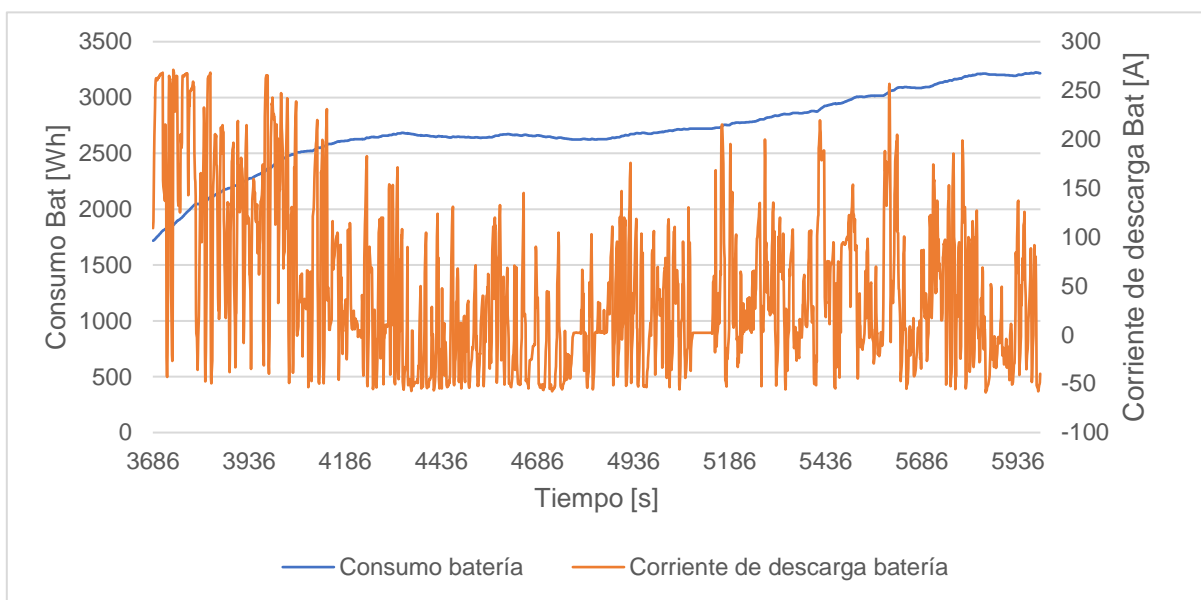


Figura 4.20 Consumo batería vs corriente de descarga

4.4.2.3 Batería vs régimen de motor eléctrico

La Figura 4.21 muestra el comportamiento del consumo de la batería de tracción en función de las rpm del motor eléctrico. Se pueden observar variaciones que van desde las 0 hasta un pico máximo de 5 540 rpm, donde se determina que, el consumo energético será más alto cuando se tienen picos elevados de rpm, a diferencia de cuando se tiene una reducción del régimen del motor eléctrico donde el consumo tiende a mantenerse estable.

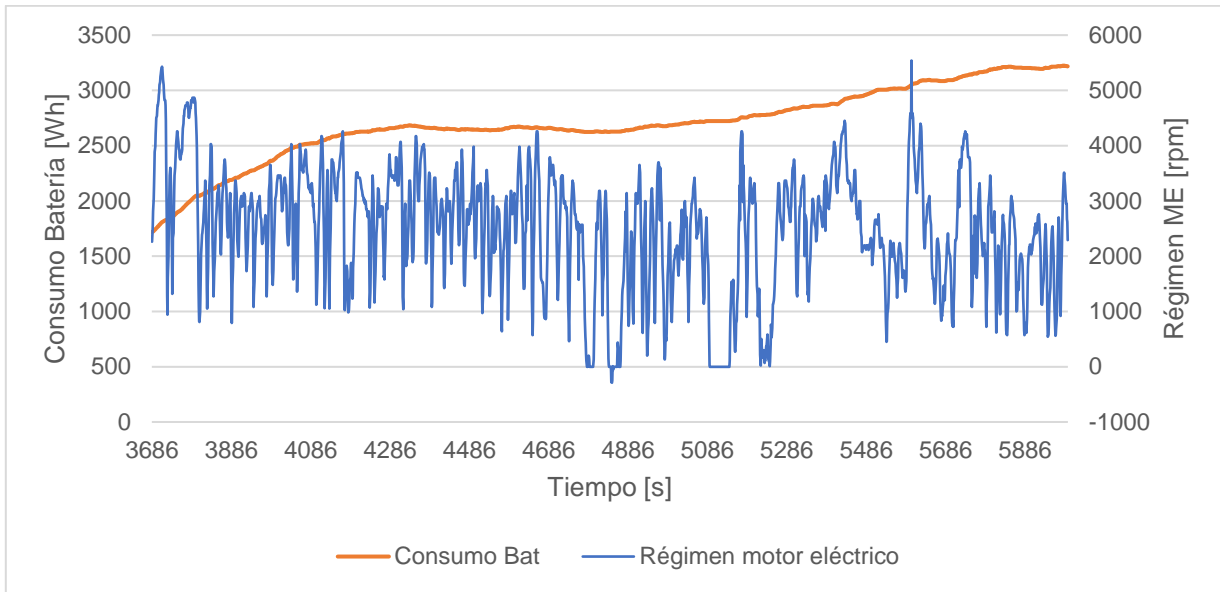


Figura 4.21 Consumo de batería vs régimen de motor eléctrico

4.4.2.4 SOCv vs altura

En el total del recorrido rural existe una relación entre las variaciones de altura y el SOCv como se observa en la Figura 4.22. En el tramo que abarca los 3 686 hasta los 4 280 segundos, la altura se incrementa en 290 m y al mismo tiempo se evidencia una reducción del SOCv desde el 67% hasta el 40%. Por otra parte, en el tramo comprendido entre los 4 356 hasta los 5 000 segundos la altura se reduce en 301,6 m, mientras que el SOCv aumenta desde el 40% hasta el 42%.

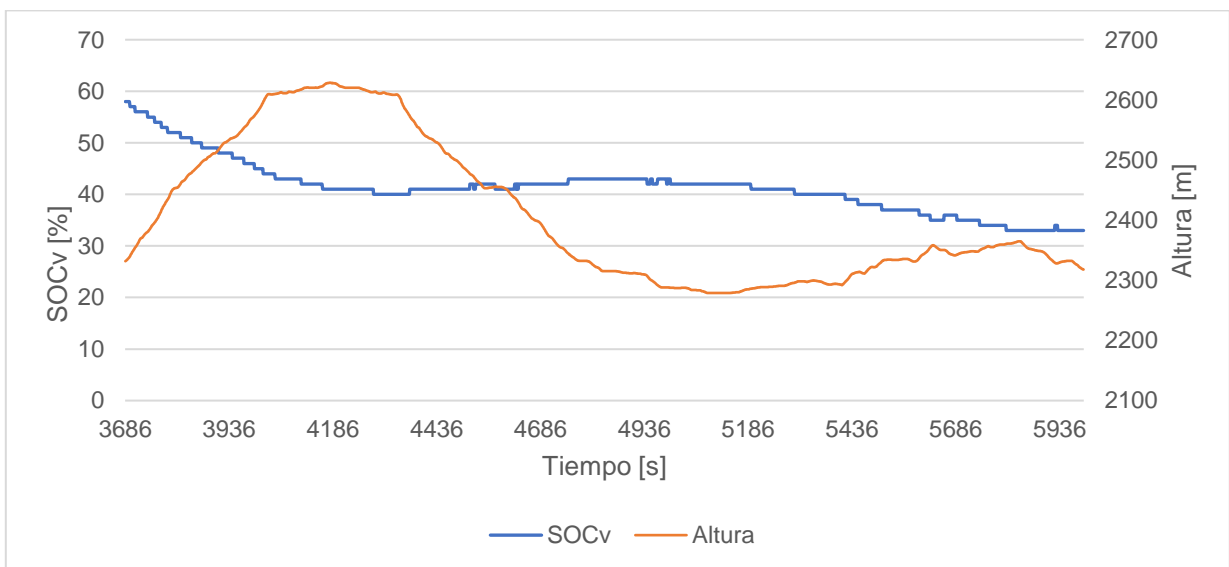


Figura 4.22 SOCv vs altura

4.4.2.5 Elementos del tren motriz vs temperatura de motor eléctrico

La Figura 4.23 muestra el comportamiento de la temperatura del motor eléctrico frente al consumo de los elementos del tren motriz durante la trayectoria rural. En el tramo que abarca desde los 3 686 hasta los 4 065 segundos se evidencia un incremento considerable en la temperatura que va desde los 90°C hasta los 108°C. Por otra parte, a partir de los 4 065 segundos la temperatura tiende a reducirse ligeramente hasta los 102°C en el segundo 4 889 y presentar mínimos incrementos hasta el final de la ruta, donde se tiene un pico máximo de 113°C.

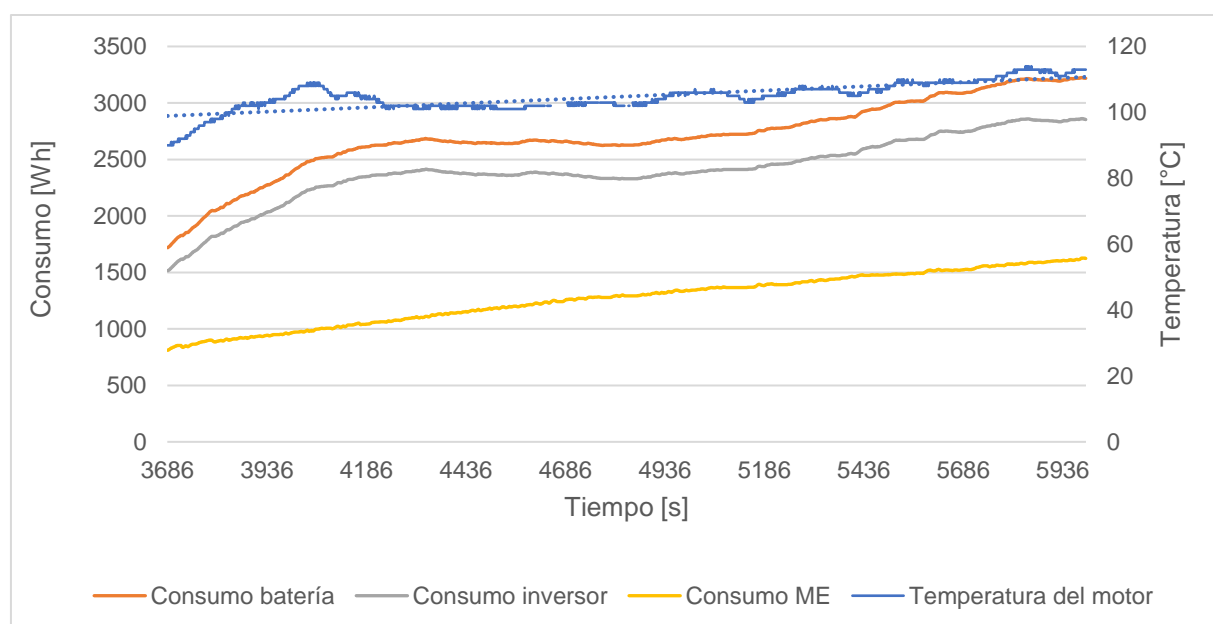


Figura 4.23 Consumo de elementos del tren motriz del VE vs temperatura ME

4.4.3 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO Y COMPONENTES

En la Tabla 4.12 se pueden observar tanto los consumos como las eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy de la sección rural. De esta forma, se determinó que la eficiencia general del VE para esta sección es del 85% con un consumo de energía real de 1 590,07 Wh. La energía de regeneración de 354,42 Wh representa el 18,23% del total la energía consumida, siendo un factor importante para obtener una alta eficiencia. Además, se obtuvo una energía de frenado de 615,78 Wh, de la cual, se regeneró una cantidad de 354,42 Wh, lo que representa una eficiencia del sistema de freno regenerativo del 58%.

Tabla 4.12 Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en sección rural

SECCIÓN RURAL							
Tracción	Cantidad	Unidad	Referencia	Regeneración	Cantidad	Unidad	Referencia
Eficiencia de carga batería	0,97	-	Calculada	Total energía de frenado	-615,78	Wh	Calculada
Energía consumida por batería de tracción (DC)	1 944,49	Wh	Calculada	Energía suministrada a motor eléctrico	-591,15	Wh	Calculada
Energía consumida por descarga de batería	1 855,08	Wh	Medida	Total energía regenerada por motor eléctrico	-384,46	Wh	Medida
Energía regenerada	-354,42	Wh	Medida	Energía suministrada a batería	-354,42	Wh	Medida
Energía real consumida por descarga batería	1 590,07	Wh	Medida	Eficiencia freno regenerativo	0,58	-	Calculada
Eficiencia de descarga batería	0,95	-	Calculada	Porcentaje de recuperación vs consumo	18,23	%	Calculada
Ganancia por frenada regenerativa	1,18	-	Calculada				
Energía consumida por inversor	1 724,68	Wh	Medida				
Eficiencia inversor	0,93	-	Calculada				
Energía de tracción	1 396,49	Wh	Calculada				
Eficiencia transmisión	0,96	-	Ficha				
Energía consumida por motor eléctrico (AC)	1 457,72	Wh	Calculada				
Eficiencia motor eléctrico	0,85	-	Calculada				
Eficiencia general sección rural	0,85	-	Calculada				

4.5 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO: SECCIÓN AUTOPISTA

4.5.1 ESTIMACIÓN DE ENERGÍA CONSUMIDA: TANQUE A LA RUEDA

En la sección de autopista, el Renault Twizy tuvo un consumo de 1 746,38 Wh sin considerar la energía de regeneración, que alcanzó los 202,53 Wh como se evidencia en la Figura 4.24. Las pérdidas de energía desde la batería de tracción hasta la rueda son de 383,86 Wh lo que representa un porcentaje del 21,98%, no obstante, dicho valor se reduce hasta un 11% por acción del freno regenerativo.

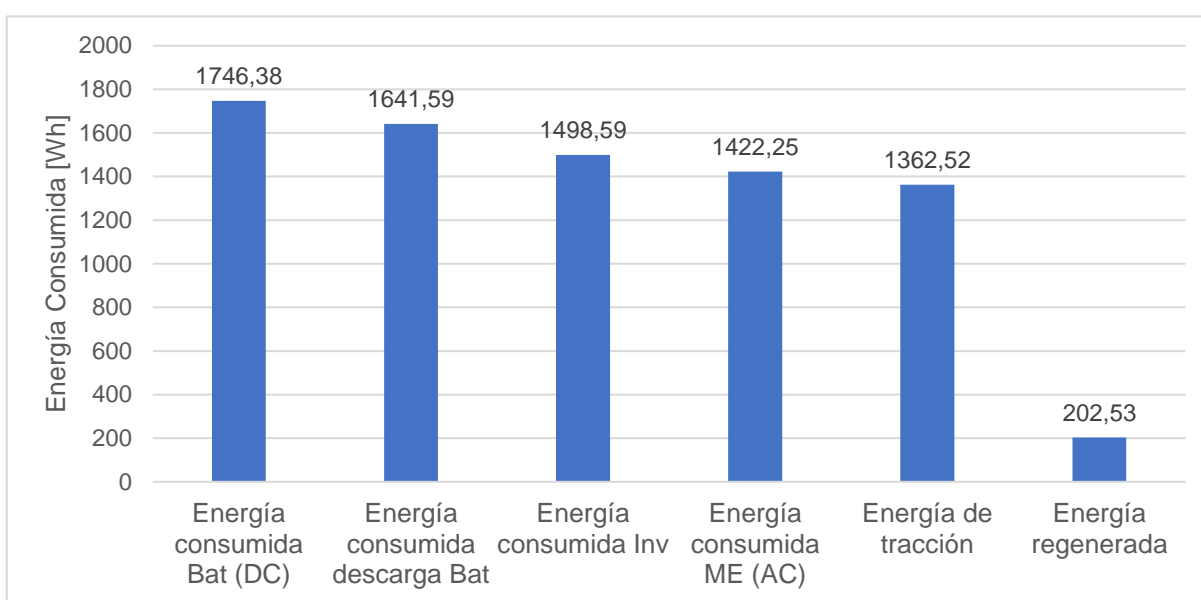


Figura 4.24 Energía consumida del tanque a la rueda en sección de autopista

4.5.2 ANÁLISIS DE ENERGÍA CONSUMIDA: COMPONENTES VS FACTORES

4.5.2.1 Batería vs velocidad

En el recorrido de autopista se evidenciaron picos de velocidades que alcanzan los 80 km/h y se obtuvo una velocidad promedio de 40,16 km/h, lo que genera aumentos de consumo en relación con la velocidad de circulación como se muestra en la Figura 4.25. En el tramo comprendido entre los 5 995 y los 6 740 segundos, donde se tiene la velocidad máxima de circulación, se denota un consumo elevado que representa una energía de 1 091,26 Wh, a diferencia del tramo que abarca los 6 741 hasta los 7 000 segundos, en donde existen reducciones en la velocidad y el consumo tiende a disminuir ligeramente.

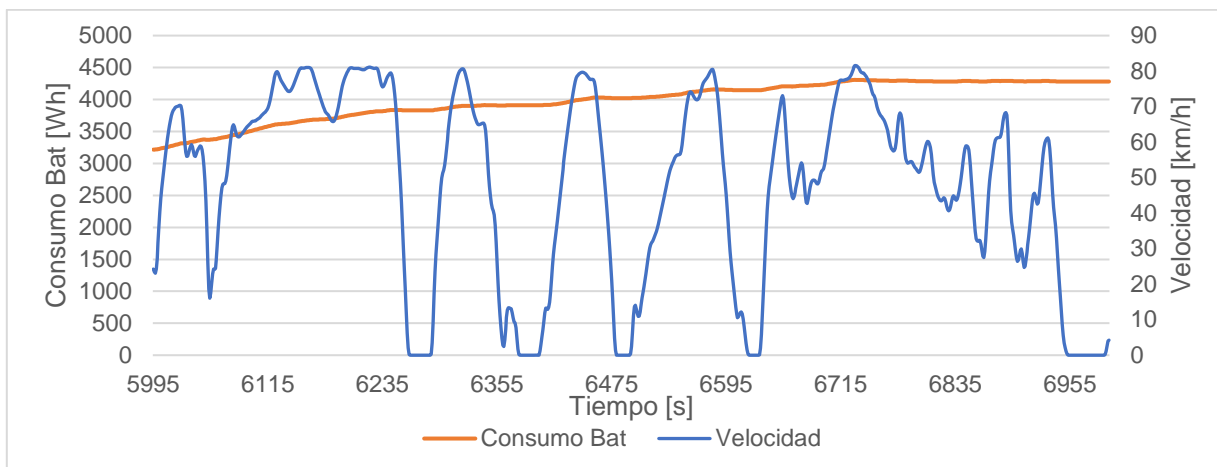


Figura 4.25 Consumo de batería vs velocidad

4.5.2.2 Batería vs corriente de descarga

Durante todo el trayecto de autopista se observó variaciones de la corriente de descarga de la batería de tracción mostrados en la Figura 4.26. En el inicio de la sección que abarca los 5 995 hasta los 7 060 segundos existen picos máximos de corriente de 307,50 A, lo que genera consumos elevados. Por otra parte, a pesar de que se tengan corrientes de regeneración que alcanzan los -63,50 A, el tiempo en el que se producen es muy corto producto de desaceleraciones bruscas, por lo que no se denota reducciones claras en el consumo.

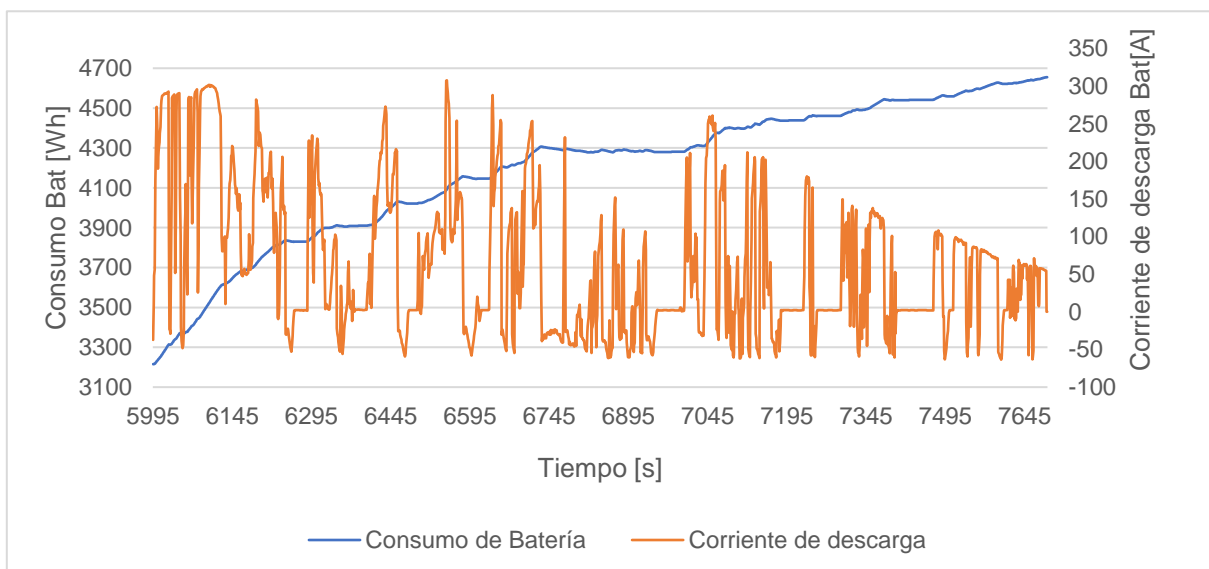


Figura 4.26 Consumo batería vs corriente de descarga

4.5.2.3 SOCv vs altura

En el trayecto de autopista se evidencia una reducción considerable del SOCv al inicio del recorrido como se muestra en la Figura 4.27. En el tramo comprendido entre los 5 995 hasta los 6 254 segundos, la altura se incrementa en 117.5 m lo que genera una caída del SOCv del 32% al 21%. Por otra parte, en el tramo desde los 6 703 hasta los 7 057 segundos, al no haber un tiempo de regeneración prolongado y a pesar de la existencia de una pendiente negativa, el SOCv tiende a mantenerse estable.

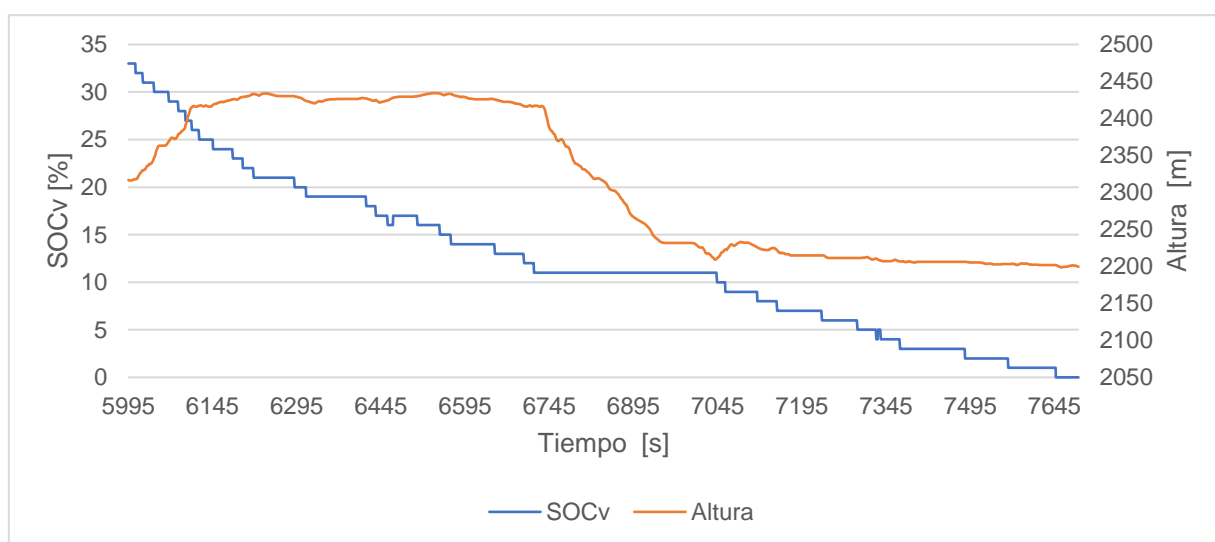


Figura 4.27 SOCv vs altura

4.5.2.4 Elementos del tren motriz vs temperatura de motor eléctrico

La Figura 4.28 muestra el comportamiento de la temperatura del motor eléctrico frente al consumo de los elementos del tren motriz durante el recorrido de autopista. En el inicio de la sección se evidencia un gran incremento en la temperatura que va desde los 113°C hasta los 128°C en un tiempo de 2,3 minutos. Esto se debe a que en este tramo se alcanzan las máximas velocidades y corrientes de descarga, además de la existencia de una pendiente positiva como se observa en la Figura 4.8 y como consecuencia se tiene un incremento en los consumos, concretamente de 380 Wh para el consumo de la batería de tracción. Por otra parte, desde los 6 139 hasta los 6 418 segundos la temperatura tiene una caída de 10°C y a partir de este punto varía ligeramente hasta alcanzar los 121°C en el final de la sección.

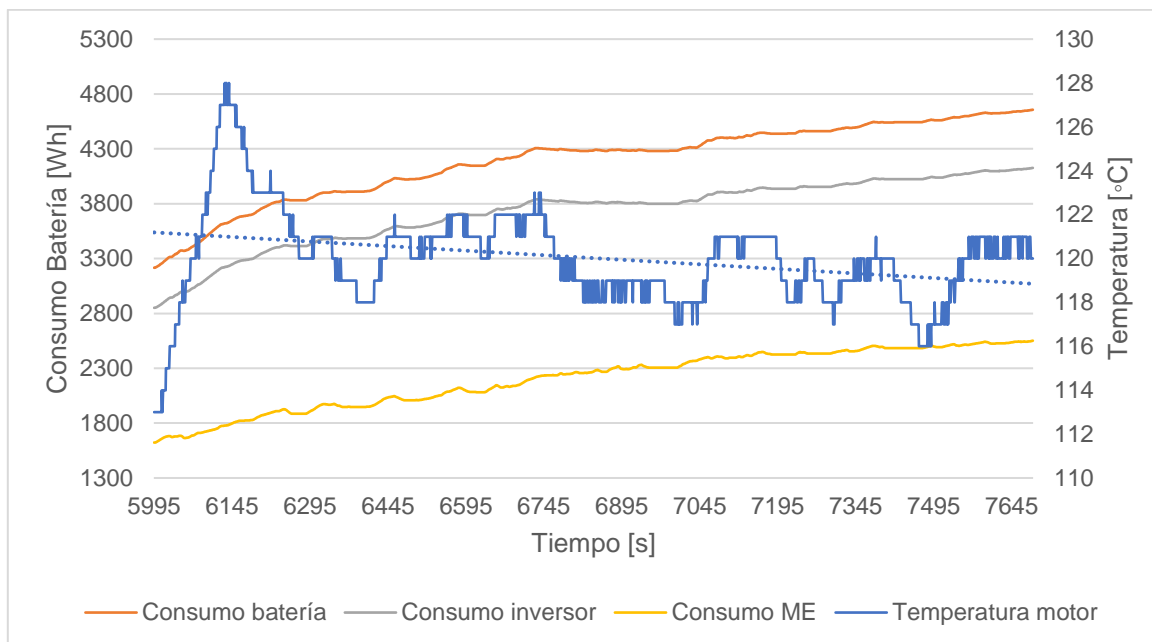


Figura 4.28 Consumo de elementos del tren motriz del VE vs temperatura ME

4.5.3 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO Y COMPONENTES

En la Tabla 4.13 se muestran tanto los consumos como las eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy durante la sección de autopista. De esta manera, se determinó que la eficiencia general del VE para esta sección es del 87% con un consumo de energía real de 1 543,85 Wh. La energía de regeneración de 202,53 Wh representa el 11,60% del total la energía consumida. Además, se obtuvo una energía de frenado de 470,87 Wh, de la cual, se regeneró una cantidad de 202,53 Wh, lo que representa una eficiencia del sistema de freno regenerativo del 43%.

Tabla 4.13 Eficiencias para cada elemento del tren motriz del Renault Twizy en sección de autopista

SECCIÓN DE AUTOPISTA							
Tracción	Cantidad	Unidad	Referencia	Regeneración	Cantidad	Unidad	Referencia
Eficiencia de carga batería	0,97	-	Calculada	Total energía de frenado	-470,87	Wh	Calculada
Energía consumida por batería de tracción (DC)	1 746,38	Wh	Calculada	Energía suministrada a motor eléctrico	-452,04	Wh	Calculada
Energía consumida por descarga de batería	1 641,59	Wh	Medida	Total energía regenerada por motor eléctrico	-225,16	Wh	Medida
Energía regenerada	-202,53	Wh	Medida	Energía suministrada a batería	-202,53	Wh	Medida
Energía real consumida por descarga batería	1 543,85	Wh	Medida	Eficiencia freno regenerativo	0,43	-	Calculada
Eficiencia de descarga batería	0,94	-	Calculada	Porcentaje de recuperación vs consumo	11,60	%	Calculada
Ganancia por frenada regenerativa	1,12	-	Calculada				
Energía consumida por inversor	1 498,59	Wh	Medida				
Eficiencia inversor	0,91	-	Calculada				
Energía de tracción	1 362,52	Wh	Calculada				
Eficiencia transmisión	0,96	-	Ficha				
Energía consumida por motor eléctrico (AC)	1 422,25	Wh	Calculada				
Eficiencia motor eléctrico	0,95	-	Calculada				
Eficiencia general sección de autopista	0,87	-	Calculada				

4.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE SECCIONES DE RUTA

4.6.1 PARÁMETROS CINEMÁTICOS

En este apartado se comparan las características cinemáticas de cada sección que compone la ruta completa de estudio. En el eje vertical izquierdo de la Figura 4.29 se muestra el porcentaje de la actividad realizada en cada recorrido (desaceleración, aceleración, tiempo inactivo y permanencia en cruce) y en el eje vertical derecho las demás variables.

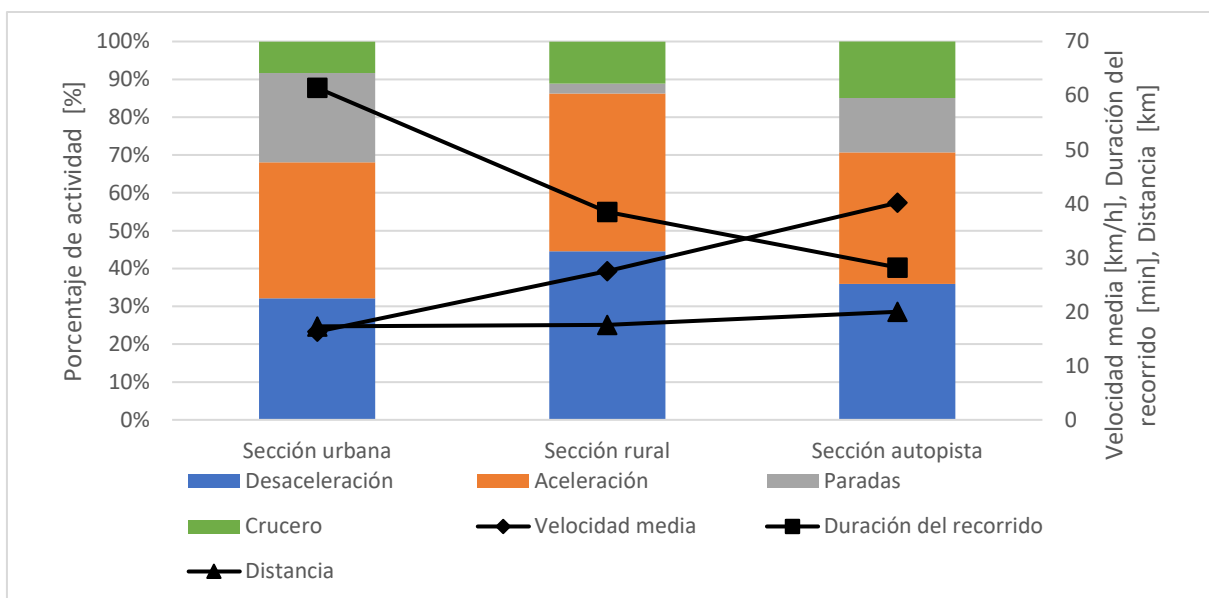


Figura 4.29 Características generales de las secciones de ruta

En la sección urbana, se tiene un mayor porcentaje de tiempo inactivo, debido a las constantes intersecciones y congestión vehicular. Además, se tiene la mayor duración del recorrido, pero en comparación con la sección rural y de autopista se tiene menor distancia y velocidad media.

En la sección rural, se evidencia el menor tiempo inactivo con relación a las otras dos secciones, así como también presenta el mayor porcentaje de desaceleraciones. En cuanto a la duración del recorrido es mucho menor en relación con la sección urbana, pero resulta mayor a la de autopista.

En la sección de autopista, se tiene la mayor distancia, velocidad media y un elevado porcentaje de permanencia en cruce. No obstante, se evidencia menor tiempo de duración con respecto a las demás secciones.

4.6.2 ENERGÍA CONSUMIDA: TANQUE A LA RUEDA

En los apartados anteriores, se cuantificó los consumos correspondientes para cada elemento del tren motriz en la ruta de ensayo y sus secciones. No obstante, en la Figura 4.30 se pueden observar estas variables en un solo gráfico a manera de resumen. De esta forma, se establece que el mayor consumo de energía del paquete de baterías del Renault Twizy se dio en la sección urbana. El consumo energético del resto de elementos sigue el mismo patrón que el de la batería de tracción, siendo siempre mayor en la sección urbana. Esto se debe a que, a pesar de que en la sección de autopista se tienen mayores velocidades medias y mayores distancias, la duración de su recorrido es menos de la mitad en relación con la sección urbana, como se evidencia en la Figura 4.29.

Además, la energía de regeneración es superior en la sección rural como resultado de su mayor porcentaje de desaceleraciones producidas por el perfil de altura, que en gran parte del recorrido es descendente.

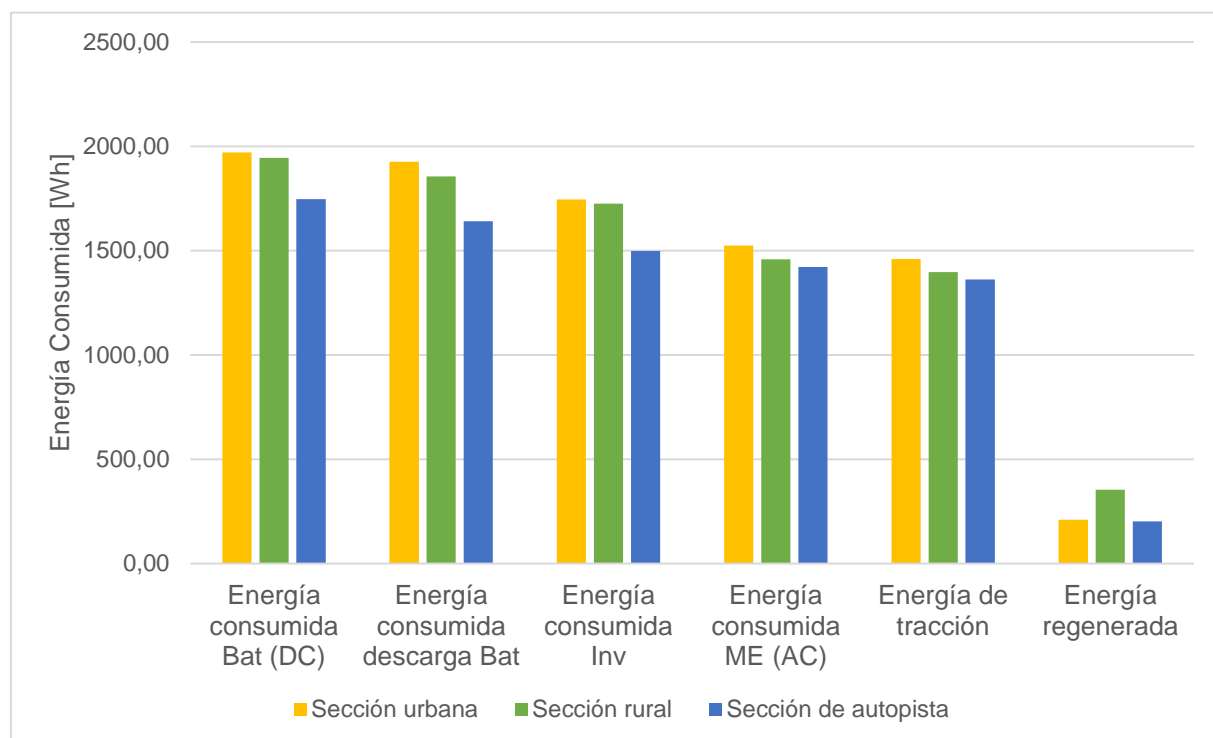


Figura 4.30 Comparación de energía consumida del tanque a la rueda entre secciones de ruta

Por otra parte, en la Figura 4.31, se muestran los consumos reales de la batería de tracción (considerando la energía de regeneración) de cada una de las secciones, incluyendo el valor de

4 894,54 Wh, que representa el consumo acumulado real durante toda la trayectoria. Además, se presentan los índices de consumo estimados por cada 100 km, que en promedio son: de 10,18 kWh para la sección urbana, con una velocidad promedio de 16,3 km/h, de 9,03 kWh con una velocidad media de 27,5 km/h para la sección rural, de 7,72 kWh con una velocidad promedio de 40,2 km/h para la sección de autopista y de 8,92 kWh con una velocidad promedio de 24,93 km/h para el total del recorrido.

El consumo del paquete de baterías del Renault Twizy durante una simulación del ciclo de conducción WLTC clase 2 mediante el software ALV Cruise, realizado por el autor (Torres Macció, 2018, pág. 41), es de 8,56 kWh/100km. Dicho valor es inferior en un 4,04% en comparación con el consumo total obtenido en el presente estudio.

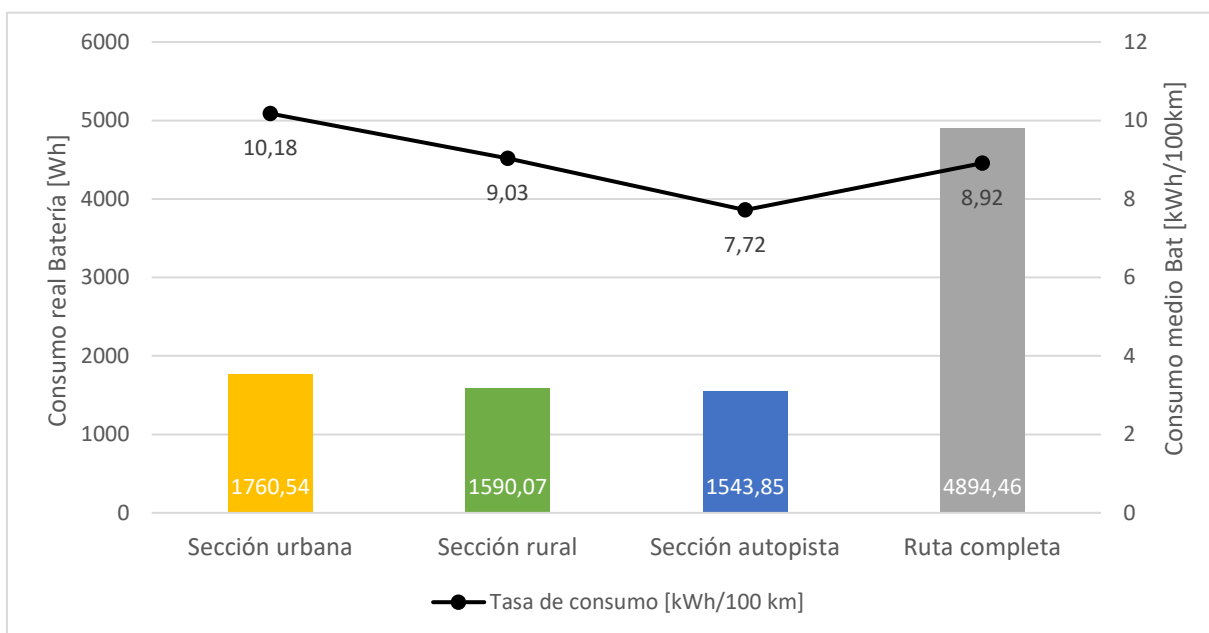


Figura 4.31 Consumo real de la batería para cada sección de ruta

Asimismo, en la Tabla 3.2 del capítulo anterior se muestra el consumo medio establecido por el fabricante para un ciclo de conducción urbano, cuyo valor es de 6,3 kWh/100 km, mismo que difiere en un 38,11% con respecto al valor obtenido bajo las condiciones de este trabajo para la sección urbana. Esta diferencia viene dada por los distintos métodos de evaluación en los VE. De acuerdo con Renault (2016) el consumo medio de 6,3 kWh/100 km fue estimado en condiciones estacionarias (banco dinamométrico) y en base al ciclo de conducción ECE-15,

donde se evidencia un perfil de velocidades bastante uniforme, a diferencia del perfil de velocidades obtenido en el presente estudio a través de condiciones reales de manejo.

4.6.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE TENSIÓN DE BATERÍA

El voltaje de operación de la batería de tracción varía en función del SOC real. Las tensiones registradas durante la sección urbana se encuentran en el rango de los 52 V a los 58 V, con una mediana de 55,62 V. Existen valores de dispersión que superan los valores iniciales y finales de tensión, tal y como se observa en la Figura 4.32. Esto se debe a que la BMS regula el voltaje de operación de la batería, aumentándolo durante las desaceleraciones y disminuyéndolo en las aceleraciones que requieren corrientes elevadas.

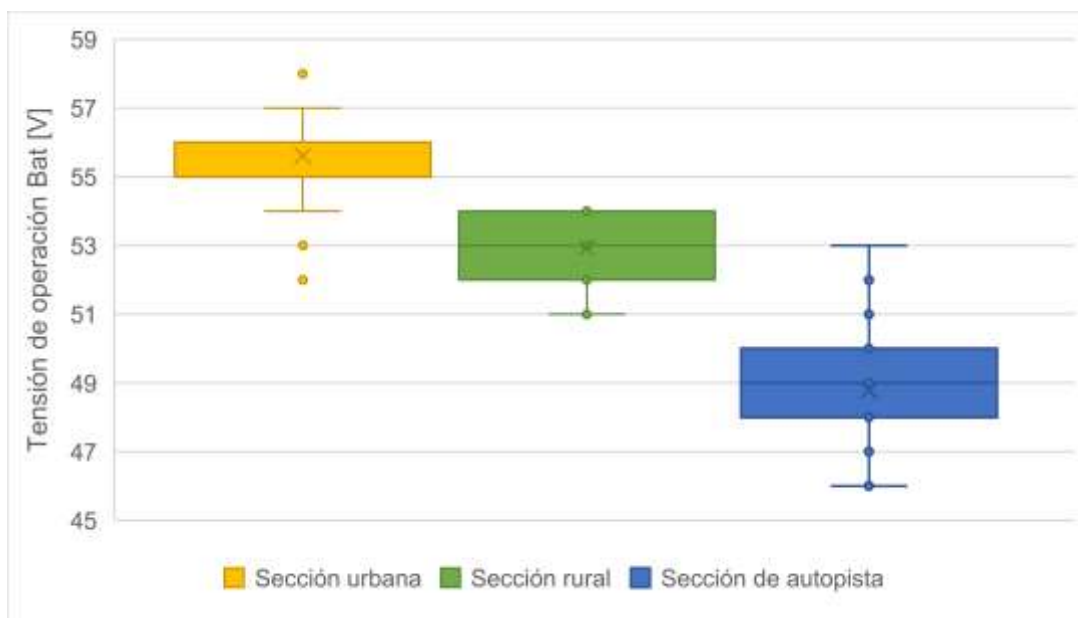


Figura 4.32 Comportamiento de tensión de la batería de tracción

Para la sección rural el valor de la tensión de descarga de la batería de tracción varía de los 51 a los 54 V con una mediana de 52,94 V. Se evidencia que el SOC real no tuvo cambios significativos. Por lo tanto, la energía real de la batería tiende a mantenerse estable a pesar de que el escáner muestre una reducción del 27% del porcentaje de carga.

A pesar de que al final de la sección de autopista el SOCv sea del 0%, aún existe energía en la batería de tracción que puede ser representada con el SOC real. Las medidas de tensión de

descarga muestran que la energía de la batería se redujo considerablemente al tener un valor inicial de 53 V y uno final de 46 V, con una diferencia de 7 V. Además, se debe considerar que el vehículo detuvo su funcionamiento al llegar al valor mínimo de tensión, manteniendo las tolerancias de descarga que se muestran en la Figura 3.14 del capítulo anterior.

4.6.4 ANALISIS DE LA EFICIENCIA DE DESCARGA DE BATERÍA VS FACTORES

En la Figura 4.37 se presenta el comportamiento de la eficiencia de descarga de la batería de tracción del VE en función de parámetros tales como: altitud, velocidad, corriente de descarga de batería y posición del pedal del acelerador. Se ha considerado un tramo que va desde los 3 496 hasta los 6 300 segundos, que incluye la totalidad del trayecto rural y el inicio y final de la sección de autopista y urbana respectivamente.

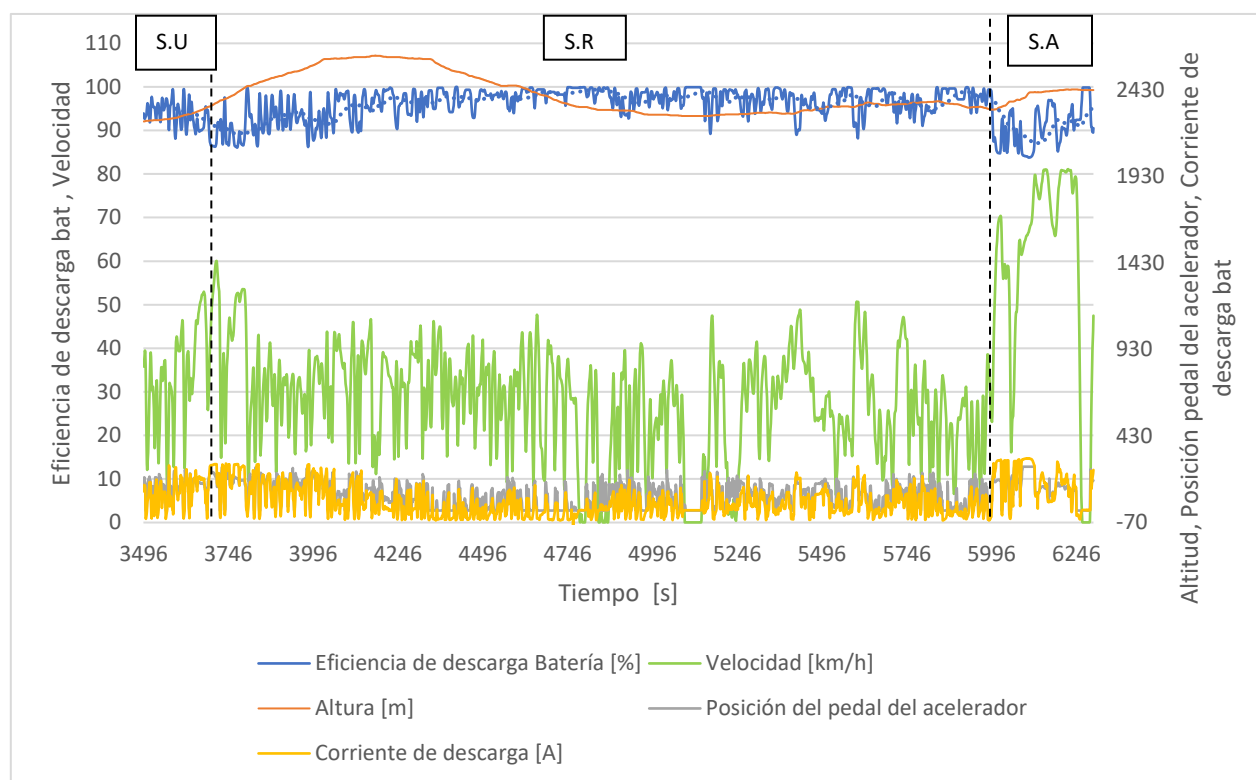


Figura 4.33 Eficiencia de descarga de batería vs factores

Al final de la sección urbana e inicio de la sección rural, se observa una caída de las eficiencias de descarga de la batería desde valores superiores al 95% hasta un mínimo del 86,27% provocada principalmente por el aumento pronunciado de la altura, la velocidad y la corriente de descarga de la batería. Cuando la altura se mantiene en un valor relativamente constante, los valores de eficiencias siguen el mismo patrón, con ligeras variaciones que dependen directamente de la corriente de descarga, denotándose una relación inversamente proporcional entre estas dos variables. Dicha relación se evidencia con mayor claridad a partir del segundo 6 000, en donde la corriente de descarga alcanza su valor máximo de 307,50 A, mientras que la eficiencia de descarga se reduce hasta su valor mínimo de 83,80% a pesar de que la diferencia de altitud no sea tan pronunciada.

Por lo tanto, uno de los factores que más intervienen en la variación de la eficiencia de descarga de la batería, es su corriente de descarga. Es necesario aclarar que el valor de corriente de descarga se relaciona directamente con la posición del pedal del acelerador, tal y como se observa en la figura anterior. De esta forma, el modo de operación del conductor será el que determine las variaciones existentes en el rendimiento de la batería de tracción.

Por otra parte, un factor que también influye en la eficiencia de descarga de batería a lo largo de toda la trayectoria es el SOCv, como se muestra en la Figura 4.38. Cuando se tienen estados de carga por encima del 60% correspondientes a la sección urbana, las eficiencias en su mayoría superan el 95%. Cuando el SOCv presenta valores por encima del 35% y por debajo del 60%, se observan más valores de dispersión en la eficiencia de descarga, con valores mínimos de 86,15%. Finalmente, cuando el SOCv es inferior al 35%, los valores de dispersión de la eficiencia de descarga se evidencian con mayor claridad, alcanzando valores mínimos del 83,79%. Por lo tanto, mientras menor sea el estado de carga, menor será la eficiencia de descarga de la batería y, por consiguiente, la eficiencia de descarga en la sección de autopista será menor.

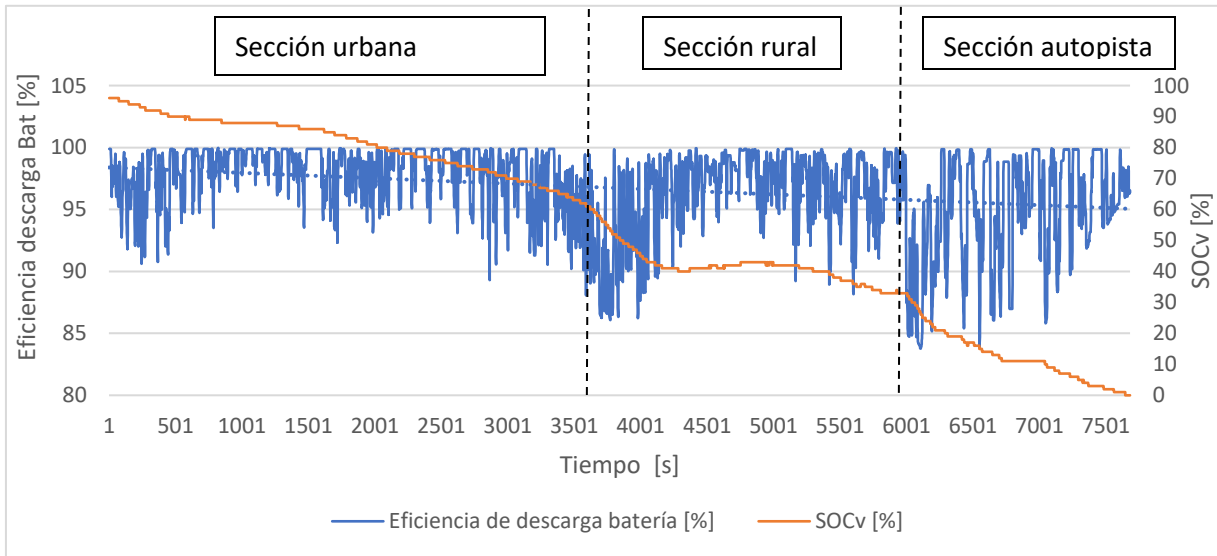


Figura 4.34 Influencia del SOCv en la eficiencia de descarga de batería del Renault Twizy

4.6.5 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO Y COMPONENTES

En la Tabla 4.14 se presentan las eficiencias promedio de los elementos del tren motriz del VE en función de cada sección de ruta. Debido al elevado porcentaje de SOH mostrado en la Tabla 4.9, se evidencia que la eficiencia de descarga de batería se encuentra por encima del 94% en todas las rutas, presentando reducidas pérdidas durante la conversión de energía química a energía eléctrica.

A su vez, al haberse obtenido la eficiencia del inversor como dato individual, se determinó un porcentaje por encima del 91% en las tres secciones. Estos datos se encuentran muy próximos a los expuestos por los autores (López Martínez, 2016) & (Wassiliadis et al., 2022).

Además, las eficiencias del motor eléctrico se mantuvieron cercanos a los valores indicados por el autor (Egaña et al., 2016), a excepción del valor correspondiente a la sección de autopista. Esto se debe a que el ME del Renault Twizy alcanza su máxima eficiencia con valores superiores a las 3 500 rpm con un torque de entre 30 y 40 N.m, tal y como se indica en la Figura 3.19. Este elevado valor provoca que la eficiencia general del VE para la sección de autopista sea mayor que la de las otras dos secciones, por lo que se obtienen consumos inferiores, tal y como se evidenció en la Figura 4.34.

Adicionalmente, la ganancia por frenada regenerativa supera el 11% en todas las secciones, siendo su máximo valor de 18% para el caso de la sección rural, lo que ayuda a mejorar la eficiencia general del VE en comparación a la sección urbana.

Tabla 4.14 Eficiencias de los elementos del tren motriz para cada sección de ruta

Eficiencias	Sección	Urbana	Rural	Autopista
Eficiencia de descarga batería		0,98	0,95	0,94
Eficiencia inversor		0,91	0,93	0,91
Eficiencia ME		0,87	0,85	0,95
Eficiencia transmisión		0,96	0,96	0,96
Ganancia por frenada regenerativa		1,11	1,18	1,12
Eficiencia del VE		0,83	0,85	0,87

4.7 EFICIENCIA DEL VEHÍCULO PARA DISTINTOS COEFICIENTES DE RODADURA

Todos los parámetros analizados anteriormente influyen directamente en el comportamiento de la eficiencia general del VE. No obstante, aún no se han considerado factores externos relacionados con el tipo de calzada por la que se circuló durante las pruebas experimentales. El factor que varía en función de la superficie de la carretera es el coeficiente de rodadura, tal y como se mencionó en la Tabla 3.8 del capítulo anterior del presente trabajo.

Los valores de coeficientes de rodadura que se usaron para los resultados mostrados anteriormente, además de dos variaciones con sus respectivas eficiencias, se observan en la Tabla 4.15. Si se considera que todo el trayecto fue realizado sobre una superficie de hormigón (0,015), la resistencia a la rodadura del VE, el consumo y la eficiencia del motor eléctrico aumentan considerablemente y, por consiguiente, la eficiencia general del VE se incrementa en un 4%. No obstante, al realizar la variación 1 en la sección de autopista, en donde el valor original de eficiencia del ME es del 95%, los valores de consumo de este elemento superan a los del inversor, obteniéndose una eficiencia del ME superior a 1. Por lo tanto, la eficiencia en

la sección de autopista con la variación 1, aumenta en un 10%, por lo que el coeficiente de rodadura, es un valor de suma importancia dentro del cálculo de la eficiencia de un VE.

Tabla 4.15 Eficiencias calculadas con diferentes coeficientes de rodadura

	Coefficientes de rodadura	Sección urbana	Sección rural	Sección autopista	Ruta completa
Prueba realizada	0,015 – 0,01	0,83	0,85	0,87	0,85
Variación 1 (Superficie de hormigón)	0,015	0,83	0,86	0,97	0,89
Variación 2 (Asfalto con neumático de alto rendimiento)	0,006	0,71	0,72	0,79	0,74

Además, se realizó la variación 2 considerando un valor de coeficiente de rodadura (0,006) para condiciones óptimas, es decir, con carretera de asfalto y neumáticos en excelente estado. Con este procedimiento, se obtuvo una reducción en las eficiencias que superan el 8% en todas las secciones de ruta. Es necesario aclarar que las eficiencias no deberían verse reducidas al disminuir el coeficiente de rodadura, ni tampoco presentar valores de eficiencia superiores a 1 al incrementarlo. Estas incongruencias surgen debido a que, únicamente se está modificando el consumo del motor eléctrico, sin considerar los parámetros de la batería y del inversor trifásico. Para evidenciar la influencia del coeficiente de rodadura en el cambio de la eficiencia, es necesario realizar nuevas campañas experimentales con las condiciones de las variaciones mencionadas anteriormente.

Por otra parte, el coeficiente de rodadura, además del tipo de calzada, depende principalmente de valores relacionados con la geometría, presión, temperatura y materiales de construcción del neumático. Estos parámetros no fueron considerados en el presente estudio debido a la complejidad de su obtención. Sin embargo, si se requieren resultados mucho más precisos, es necesario que dichos parámetros sean estudiados con mayor profundidad.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El presente estudio propuso un marco metodológico original para analizar la eficiencia de un vehículo eléctrico (VE). En general, este marco metodológico incluyó siete etapas; de hecho, las tres primeras permitieron seleccionar la ruta, el vehículo y la instrumentación para la campaña experimental. Por su parte, la cuarta etapa permitió planificar la campaña experimental, incluyendo la instalación de equipos en el vehículo de pruebas. Mientras que en las últimas tres etapas se ejecutaron tareas de pre y post procesamiento de los datos experimentales con el propósito de estimar y evaluar la eficiencia del vehículo probado.
- Para analizar la eficiencia de las distintas secciones del tren de potencia del VE, en el presente trabajo se analizó el flujo de energía en dos direcciones: (i) de la batería de tracción al motor eléctrico (basándose en parámetros eléctricos) y (ii) de la carretera al motor eléctrico (en función de variables cinemáticas). De este modo, se determinó que la eficiencia general del VE era del 85% (con un consumo de 4 894,46 Wh) para todo el recorrido de prueba. Por otro lado, se estimó que las eficiencias parciales de los elementos del tren motriz eran: 96% para la descarga de batería, 92% para el inversor, 89% para el motor eléctrico, y una ganancia de frenado regenerativo de aproximadamente 1,14. Es importante mencionar que, para estas estimaciones parciales, se asumió que la transmisión tenía una eficiencia constante de 96%.
- En la ruta de pruebas se incluyeron tres tipos de zonas: (i) urbana, (ii) rural, y (iii) autopista; las eficiencias para estas zonas fueron del 82%, 85 y 87%, respectivamente. La menor eficiencia en la sección urbana puede relacionarse con el hecho de que en esta zona el vehículo tiene que afrontar una mayor frecuencia de eventos de aceleración y desaceleración.

- El consumo medio establecido por el fabricante para el ciclo de conducción urbano ECE-15 es de 6,3 kWh/100 km y difiere en un 38,11% con respecto al valor obtenido en el presente estudio. Esta diferencia se produce debido a que los valores determinados por el fabricante se estiman en condiciones estacionarias (banco dinamométrico), donde se evidencia un perfil de velocidades bastante uniforme, a diferencia del obtenido en condiciones reales de manejo.
- El coeficiente de rodadura (C_r) es un factor que puede influir significativamente en la eficiencia del vehículo. Aunque este coeficiente depende principalmente del neumático, también puede variar con la superficie de la carretera. Para este estudio se consideró un $C_r=0.015$ para la zona urbana que incluye carreteras mayormente adoquinadas y un $C_r=0.001$ para las zonas rural y autopista que están asfaltadas. Para cuantificar el efecto de C_r en la eficiencia del VE, se crearon escenarios asumiendo coeficientes de 0.006 y 0.015 para toda la ruta de estudio, sin embargo, los resultados obtenidos no permitieron establecer una mejora en la eficiencia del V. Esto se debe a que los parámetros eléctricos del VE también deberían modificarse para generar otros escenarios de funcionamiento del vehículo.
- Las eficiencias promedio de descarga de la batería fueron del 98% (con un SOCv superior al 60%), 95% (con un SOCv entre el 35% y el 60%) y 94% (con un SOCv inferior al 35%) correspondientes a la sección urbana, rural y de autopista respectivamente. Por lo tanto, mientras menor sea el estado de carga, menor será la eficiencia de descarga de la batería.
- Durante todo el recorrido se obtuvieron valores de energía regenerada de 209,46 Wh, 354,42 Wh y 202,53 Wh para la sección urbana, rural y de autopista respectivamente. La mayor regeneración se alcanzó en la sección rural debido a que el 42,75% del tiempo se circuló por una pendiente negativa, cuya recuperación representa el 18,23% del total de la energía consumida en este tramo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Durante la obtención de resultados, surgieron problemas en el cálculo de la potencia de tracción, principalmente relacionados con errores en la medición de altura por parte del equipo GPS Columbus P-1. Por este motivo, se recomienda el uso de un barómetro datalogger para obtener con mayor precisión todos los datos de altitud durante las pruebas.
- Puesto a que en presente estudio se procesó manualmente los datos del escáner automotriz, se recomienda que, para futuras investigaciones, se utilice un equipo capaz de registrar y exportar datos de manera automática.
- El SOC real es uno de los parámetros más importantes del VE. Por esta razón, es recomendable que para futuras investigaciones se realice su estimación en base a datos reales, por medio de técnicas como la medición del voltaje en circuito abierto a diferentes corrientes de descarga. Es necesario aclarar que el cálculo realizado del voltaje en circuito abierto en el presente trabajo posee carencias como estar basado en un circuito equivalente de la batería o mantener constantes las resistencias de carga y descarga, por lo que su estimación (considerando todas las variables) permitirá obtener valores con mayor precisión.
- Una de las variables que intervienen en el cálculo de la eficiencia global del VE es la eficiencia de la transmisión, por lo que, se sugiere considerar su estimación mediante el uso de equipos que permitan obtener parámetros como la potencia y el torque del motor eléctrico.
- La eficiencia de descarga de la batería depende directamente de su estado de carga. Por esta razón, es recomendable estimar esta variable alternando el orden de recorrido de la ruta para evidenciar las posibles diferencias.

- El coeficiente de rodadura no depende únicamente del tipo de calzada, sino también de valores relacionados con la geometría, presión, temperatura, materiales de construcción del neumático y su desgaste. Estos parámetros no fueron considerados en el presente estudio debido a la complejidad de su obtención. Sin embargo, si se requieren resultados mucho más precisos, es necesario que dichos parámetros sean estudiados con mayor profundidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AEADE. (2020). *Anuario 2020*. 83. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2021/06/ANUARIO-2020-AEADE.pdf>
2. Al-Wreikat, Y., Serrano, C., & Sodré, J. R. (2022). Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle. *Energy*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122028>
3. Antoni, J., Mar, R., & Doblado, B. (2017). *Vehículos Eléctricos e H bridos* (Paraninfo (ed.); 1st ed.). <https://books.google.com.ec/books?id=3LwrDwAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
4. Autel. (n.d.). *Manual de usuario-Autel Maxicheck Mx808*. 86147779, 150.
5. AutoSoporteTV. (2022). * C mo Funciona el Freno Regenerativo en un Auto Eléctrico?* - YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Rg7U-advZQM&t=2820s&ab_channel=AutoSoporteTV
6. Badin, F., Le Berr, F., Briki, H., Dabadie, J. C., Petit, M., Magand, S., & Condemine, E. (2013). Evaluation of EVs energy consumption influencing factors: Driving conditions, auxiliaries use, driver's aggressiveness. *World Electric Vehicle Journal*, 6(1), 112–123. <https://doi.org/10.3390/wevj6010112>
7. Barcellona, S., Colnago, S., Dotelli, G., Latorrata, S., & Piegari, L. (2022). Aging effect on the variation of Li-ion battery resistance as function of temperature and state of charge. *Journal of Energy Storage*, 50, 104658. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.104658>
8. Blazquez Garcia, F., Rodriguez Arribas, J., & Alonso Rodriguez, A. M. (2014). *Maquinas sincronas y maquinas de corriente continua*. Dextra Editorial. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/43935>
9. Calsina Fleta, M. (2011). *Circuitos electrotecnicos basicos: sistema de carga y arranque*

- del vehiculo*. Macmillan Iberia, S.A. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/52817>
10. Camuendo, O. F., & Pastaz, M. P. (2021). *Análisis de ciclo de vida de vehículos urbanos y propuesta de reutilización de baterías de alto voltaje* [Universidad Técnica del Norte]. https://rraae.cedia.edu.ec/Record/UTN_575990c2a1e2c7010b4298c38446e97e
 11. Charlotte Argue. (2020). *¿En qué medida afecta la temperatura a la autonomía de los vehículos eléctricos?* | *Geotab*. <https://www.geotab.com/es/blog/temperatura-autonomia-vehiculos-electricos/>
 12. Chauvin Arnoux Group. (2012). *Manual de instrucciones de analizador de redes eléctricas trifásicas. 1*, 116. <http://www.chauvin-arnoux.com>
 14. Columbus. (n.d.). *Manual de usuario-Gps Columbus P-1. 3*.
 15. Consejo Nacional de Planificación. (2017). Plan Nacional del Buen vivir 2017-2021. *Educational Research, 1*, 150. <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
 16. Cuesta, G. (2017). *Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de categoría L7 tipo Smart* [Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108997/tfmguillermocuestafinal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 17. de la Torre, F. (2019). Máquina Sincrónica. *Instituto Politécnico, Quinto*, 0–19.
 18. De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., & Leijon, M. (2012). Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61*(2), 475–484. <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2177873>
 19. Del Valle, J. A., Viera, J. C., Anseán, D., Brañas, C., Luque, P., Mántaras, D. Á., & Pulido, Y. F. (2018). Design and Validation of a Tool for Prognosis of the Energy

- Consumption and Performance in Electric Vehicles. *Transportation Research Procedia*, 33, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.073>
20. Denton, T. (2020). Electric and hybrid vehicles. In *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications* (2nd ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.1002/9781118954454.ch7>
21. Diario As. (2021, July 15). *Europa pone fecha al fin de los coches diésel y gasolina - AS.com*. https://as.com/diarioas/2021/07/14/actualidad/1626279713_033089.html
22. Diario Oficial de la Unión Europea. (2017). *REGLAMENTO (UE) 2017/1151 DE LA COMISIÓN* (Issue 4). <https://www.boe.es/doue/2017/175/L00001-00643.pdf>
23. Díez, P. (2019). *Principios básicos del vehículo eléctrico*. 1–77.
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/36790>
24. Ding, N., Prasad, K., & Lie, T. T. (2017). The electric vehicle: A review. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 9(1), 49–66.
<https://doi.org/10.1504/IJEHV.2017.082816>
25. Dirección de planificación y desarrollo territorial. (2020). Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Ibarra. *GADMU Ibarra*, 99.
https://www.academia.edu/27357890/PLAN_DE_DESARROLLO_Y_ORDENAMIENTO
26. Duce, A. Del. (2013). *Guidelines for the LCA*. January.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2782.8244>
27. Egaña, I., Pujana, J., & Vergara, F. (2016). Electric Drive Specifications. *Ultralight and Ultrasafe Efficient Electric Vehicle*.
<https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a75f571b&appId=PPGMS>
28. El Universo. (2020). *En tres provincias se concentra la mayor compra de carros eléctricos*

/ Economía | Noticias | El Universo.

<https://www.eluniverso.com/noticias/2020/08/12/nota/7939423/mercado-vehiculos-electricos-ecuador-2020/>

29. Electropaedia. (n.d.). *Lithium Battery Failures*.
https://mpoweruk.com/lithium_failures.htm
30. Energía y Sociedad. (2018). *La eficiencia energética del vehículo eléctrico | Energía y Sociedad*. <https://www.energiaysociedad.es/manenergia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>
31. Enge, P., Enge, N., & Zoepf, S. (2021). *Electric Vehicle Engineering* (Mc Graw Hill (ed.); 1st ed.).
32. Fernández, R. A. (2021). Stochastic analysis of future scenarios for battery electric vehicle deployment and the upgrade of the electricity generation system in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128101. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128101>
33. Goodarzi, Gordon A. Hayes, J. G. (2018). *Electric powertrain energy systems, power electronics drives for hybrid, electric fuel cell vehicles* (Vol. 1).
34. Guglielmetti, F. (2021). *Tras nueva reglamentación Ecuador podría cumplir meta de movilidad eléctrica para 2025*. <https://portalmovilidad.com/tras-nueva-reglamentacion-ecuador-podria-cumplir-meta-de-movilidad-electrica-para-2025/>
35. Hamada, A. T., & Orhan, M. F. (2022). An overview of regenerative braking systems. *Journal of Energy Storage*, 52, 33. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105033>
36. Husain, I. (2021). *Electric and Hybrid vehicles design fundamentals* (CRC Press (ed.); 3rd ed., Vol. 4, Issue 1). Taylor & Francis Group.
37. Iglesias Adolf, M. (2016). *Montaje y mantenimiento de maquinas electricas rotativas: UF0897*. Cano Pina. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/43127>
38. Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C.,

- Moure, M. ., & Valdez, M. . (2015). *Modelado y simulación de una batería de Ion-Litio comercial multicelda*. November 2016, 464–469.
https://www.researchgate.net/publication/234588217_MODELADO_Y_SIMULACION_DE_UNA_BATERIA_DE_ION-LITIO_COMERCIAL_MULTICELDA
39. INEN. (2017). Norma técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 2. <http://www.aeade.net/wp-content/uploads/2016/12/PROYECTO-A2-NTE-INEN-2204.pdf>
40. J. Ferrer, & E.J. Dominguez. (2016). *Sistemas de transmisión y frenado*. Editex.
41. K. Young, Strunz, K., & Wang, L. Y. (2013). Electric vehicle integration into modern power networks. In *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* (Issue January). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0134-6>
42. Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained: Second Edition*. In *Electric Vehicle Technology Explained: Second Edition*.
<https://doi.org/10.1002/9781118361146>
43. Li, W., Stanula, P., Egede, P., Kara, S., & Herrmann, C. (2016). Determining the Main Factors Influencing the Energy Consumption of Electric Vehicles in the Usage Phase. *Procedia CIRP*, 48, 352–357. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.014>
44. Lopez Martinez, J. M. (2015). *Vehiculos hibridos y electricos: diseno del tren propulsor*. Dextra Editorial. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/131530>
45. López Martínez, J. M. (2016). *Vehículos Híbridos y Eléctricos* (Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ed.); 2nd ed.).
46. Lopez, N. S., Tria, L. A., Tayo, L. A., Cruzate, R. J., Oppus, C., Cabacungan, P., Isla, I., Ansay, A., Garcia, T., Cabarrubias-Dela Cruz, K., & Biona, J. B. M. (2021). Societal cost-benefit analysis of electric vehicles in the Philippines with the inclusion of impacts to balance of payments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111492.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111492>

47. Merchan Lima, J. L. (2017). Estudio del Rendimiento Energético de un Vehículo Eléctrico en la Ciudad de Cuenca [Universidad de Cuenca]. In *Lola Malverde*.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30321>
48. Morales, J. R. (2017). *Estudio de la dinámica de tracción de un vehículo eléctrico* [UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA].
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/51048d49-3511-4ab9-9e5a-5d86c9b62029/content>
49. Morente Fernández, C. (2015). *Análisis y Modelado del Comportamiento de Baterías para Vehículos Eléctricos*. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23050>
50. Motor trend. (2008). Tecnologías de combustibles alternos: mirada al 2020. *Motor Trend En Español*, 8, 66–75.
51. Motoreu. (2016). *Consumo de Renault Twizy (18 CV) 2012-2018 y ficha técnica, comparaciones*. <https://motoreu.com/es/renault-twizy-consumo-ficha-tecnica-1743>
52. NaGeo. (2017). *El 90 por ciento de los vehículos del mundo podrían ser eléctricos para 2040 | National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/09/el-90-por-ciento-de-los-vehiculos-del-mundo-podrian-ser-electricos-para-2040>
53. Nguyen, C. T., Walker, P. D., Zhou, S., & Zhang, N. (2022). Optimal sizing and energy management of an electric vehicle powertrain equipped with two motors and multi-gear ratios. *Mechanism and Machine Theory*, 167(August 2021), 104513.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104513>
54. Paillacho, J., & Tequis, X. (2022). *Análisis de la Autonomía de la Batería de un Vehículo Urbano Eléctrico* [Universidad Técnica del Norte].
[http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12249/2/04 MAUT 175 TRABAJO GRADO.pdf](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12249/2/04%20MAUT%20175%20TRABAJO%20GRADO.pdf)
55. Peñalvo Lopez, E., Leon Martinez, V., & Montanana Romeu, J. (2018). *Acoplamientos*

- magneticos y maquinas electricas de induccion*. Editorial de la Universidad Politecnica de Valencia. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/57433>
56. Pérez Valderrama, J. I., & Walteros Parra, Y. M. (2016). *Sistema de gestión de carga para baterías de Ion-Litio* [Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21433/PerezValderramaJorgeIvan2016.pdf?sequence=1>
57. Pimienta Dueñas, A. M. (2007). *Conceptos basicos de maquinas electricas*. El Cid Editor. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/34441>
58. Putnieks, U. (2012). 7th International Scientific Conference: Students on their way to science. *Electric Vehicle History*, 120. https://llufb.llu.lv/conference/Students_their_Way_Science/7th_Conf_Students_their_Way_Science_2012.pdf
59. Renault. (2016). *Renault TWIZY Manual de utilización*. https://es.e-guide.renault.com/sites/default/files/pdfs/esp/X09/Twizy-913-15_ESP.pdf
60. Roás, L. (2011). Los vehículos eléctricos. *Universidad Antonio de Nebrija*, 1–9.
61. Shafique, M., Azam, A., Rafiq, M., & Luo, X. (2022). Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong. *Research in Transportation Economics*, 91(June), 101112. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101112>
62. Torres Macció, Á. S. (2018). *Comparativa Del Renault Twizy Con Diferentes Trenes De Potencia*.
63. Wagemakers, A., & Escribano Aparicio, F. J. (2017). *Introduccion a la teoria de circuitos y maquinas electricas*. Dextra Editorial. <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/148268>
64. Wassiliadis, N., Steinsträter, M., Schreiber, M., Rosner, P., Nicoletti, L., Schmid, F., Ank, M., Teichert, O., Wildfeuer, L., Schneider, J., Koch, A., König, A., Glatz, A.,

- Gandlgruber, J., Kröger, T., Lin, X., & Lienkamp, M. (2022). Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency, and lifetime from component to system level of the Volkswagen ID.3. *ETransportation*, *12*, 100167. <https://doi.org/10.1016/J.ETRAN.2022.100167>
65. Wei, H., He, C., Li, J., & Zhao, L. (2022). Online estimation of driving range for battery electric vehicles based on SOC-segmented actual driving cycle. *Journal of Energy Storage*, *49*(January), 104091. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104091>
66. Zacua. (2019). *El Watt-hora: hablemos de energía - Zacua | Acelera el futuro, auto eléctrico mexicano*. <https://zacua.com/el-watt-hora-hablemos-de-energia/>
67. Zhang, J., Wang, Z., Liu, P., & Zhang, Z. (2020). Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data. *Applied Energy*, *275*, 115408. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115408>